

Измерение параметров подстилающей поверхности для уточнения характеристик приземных антенн

И. С. Фалькович, Л. Г. Содин, Н. Н. Калиниченко

Радиоастрономический институт НАН Украины
310002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: kalinich@ira.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 1 октября 1999 г.

Рассматриваются несколько новых методов измерения параметров земли с использованием как поверхностных, так и пространственных волн декаметрового диапазона. Реализация методов основывается на применении вертикальной фазированной антенной решетки, радиотелескопа УТР-2, разностно-фазового пеленгатора. Измеренные значения комплексной диэлектрической проницаемости почвы позволяют уточнять эффективную площадь и поляризационные характеристики приземных антенн.

Розглядаються кілька нових методів вимірювання параметрів землі з використанням як поверхневих, так і просторових хвиль декаметрового діапазону. Реалізація методів базується на застосуванні вертикальної фазованої антенної ґратки, радіотелескопа УТР-2, різницево-фазового пеленгатора. Виміряні значення комплексної діелектричної проникності дають змогу уточнювати ефективну площу та поляризаційні характеристики приземних антен.

Введение

Знание комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почвы $\bar{\epsilon}$ (диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ) необходимо во многих радиофизических приложениях и, в частности, для определения характеристик различных электродинамических устройств, расположенных над поверхностью земли. Особенно сильно земля влияет на формирование поляризационных характеристик и диаграмм направленности антенн декаметрового и длинноволновой части метрового диапазона волн при достаточно низких углах места. Это связано с резкой зависимостью от угла падения коэффициента отражения от земли (коэффициента Френеля) вертикальной составляющей электрического поля. Отраженная от земли волна, интерферируя с полем падающей волны, порождает сложные частотно-угловые изменения ортогональных составляющих результирующего поля. Чтобы устранить эти искажения требуется рассчитать коэффициенты Френеля для горизонтально и вертикально поляризованных полей, которые в свою очередь зависят от ϵ и σ почвы. Кроме того, отражения волн от полупроводящей поверхности почвы уменьшают коэффициент усиления антенных решеток по сравнению со случаем идеально проводящей земли и определяют максимально достижимую флуктуационную чувствительность приемных систем.

Используемые методы измерения характеристик земной поверхности (вертикальное электрическое зондирование, индуктивные методы, измерение поверхностного импеданса почв, измерение наклона фронта радиоволны [1]) применимы, в основном, для средневолнового и длинноволнового диапазонов, когда $60\sigma\lambda \gg \epsilon$ (λ – длина волны), и позволяют, таким образом, определить только проводимость σ земли. Предложенный в [2] метод, основанный на измерении продольной поляризации поверхностной волны, дает возможность в декаметровом диапазоне определить как σ , так и ϵ . К недостаткам этого метода следует отнести использование приближенных выражений для составляющих поля, полученных при $r/\lambda \gg 1$, где r – расстояние между точками излучения и приема, тогда как в большинстве случаев представляет интерес измерение локальных параметров почвы в интервале $r/\lambda = 1 \div 3$.

В [3] для определения $\bar{\epsilon}$ предложено использовать измерения импеданса полуволнового вибратора при его размещении над реальной землей и идеально проводящей поверхностью. Трудности реализации этого метода состоят в необходимости металлизации весьма большой площади (порядка 100×100 м²). Автор работы [3] проводил также эксперименты по определению $\bar{\epsilon}$ земли, помещая ее между обкладками цилиндрического конденсатора и измеряя его емкость. Подобный подход не всегда корректен, поскольку взятие пробы меняет ее структуру и влажность.

В последние годы в Радиоастрономическом институте НАН Украины авторами настоящей статьи были разработаны и экспериментально апробированы несколько новых методов определения характеристик земной поверхности, с использованием как пространственных, так и поверхностных волн: метод измерения коэффициентов Френеля с помощью вертикальной антенной решетки и разностно-фазового пеленгатора, метод определения ϵ и σ почвы по многочастотным измерениям вертикальной компоненты электрического поля земной волны на двух расстояниях от излучателя. Исследован также эффективный метод определения КДП земли, основанный на измерении поперечной поляризации поверхностной волны при малых значениях r/λ с последующим восстановлением параметров почвы с использованием строгих расчетов ортогональных компонент поля.

Некоторые результаты этих работ были кратко описаны ранее [4-6]. В настоящей статье обобщен опыт проведенных в РИ НАН Украины на протяжении последних 10 лет теоретических и экспериментальных исследований параметров подстилающей поверхности в декаметровом диапазоне волн.

Измерение коэффициентов Френеля с помощью вертикальной фазированной антенной решетки (ФАР)

В настоящее время в основном используются косвенные методы определения комплексных коэффициентов Френеля \bar{R} через КДП $\bar{\epsilon}$ земли, основанные, например, на измерении емкости конденсатора с образцом почвы или ослабления поверхностной волны [1]. Как отмечено выше, предложенные методы применяются преимущественно в диапазонах средних и длинных волн, когда при больших длинах волн λ основную роль играет мнимая часть КДП $\text{Im } \bar{\epsilon} = -60\sigma\lambda$, определяющая ослабление и, соответственно, зону уверенного приема поверхностной волны. Кроме того, применение упомянутых методов резко усложняется, если учитывать слоистость почвы. В противном случае будет определено некоторое эффективное значение $\bar{\epsilon}_{\text{eff}}$, разное для различных методов, и дальнейший пересчет $\bar{\epsilon}_{\text{eff}}$ в \bar{R}_{eff} по известным формулам для однослойной земли может привести к неадекватному результату. Поэтому представляют интерес прямые измерения \bar{R}_{eff} , когда раздельно принимаются падающая и отраженная от земли волны и определяются отношение их амплитуд и разность фаз.

Реализация такого подхода может быть основана на формировании двух одинаковых по форме диаграмм направленности (ДН), максимумы которых зеркально ориентированы относительно горизонта, т. е. под углами места $+\Delta_0$ и $-\Delta_0$. Вертикальная высоконаправленная фазированная антенная решетка (ФАР), описанная в [7,8], по существу впервые открыла возможность прямого измерения коэффициентов Френеля для различных углов падения плоской волны.

Для проведения измерений использовалась вертикальная ФАР высотой 180 м, состоящая из 15 скрещенных вибраторов, расстояние между которыми составляло $d = 12$ м. Выходной сигнал каждого вибратора разветвлялся на два лучеобразующих устройства. Первое из них представляло собой амплитудную матрицу размерности 15×15 [9] и позволяло сформировать в вертикальной плоскости 15 ортогональных лучей ФАР, имеющих (с учетом отраженного от земли сигнала) полуширину ДН $\approx 1.6^\circ$ на частоте 15 МГц. Определение углов места принимаемого сигнала осуществлялось последовательным перебором выходов 15-ти лучей амплитудной матрицы. Кроме того, 8 нижних элементов ФАР после упомянутого разветвления фазировались матрицей Батлера размерности 8×8 , что дало возможность сформировать 3 пары ортогонально поляризованных лучей антенны, ориентированных под углами места $\Delta_0 \approx \pm 12^\circ, \pm 24^\circ, \pm 38^\circ$ при ширине отдельного луча $\approx 12^\circ$ на частоте 15 МГц. Развязка γ двух зеркальных ДН (падающей и отраженной от земли волн) определяется выражением:

$$\gamma = \frac{F(\Delta, \Delta_0)}{F(\Delta, -\Delta_0)} = \frac{\sin \left[\frac{8\pi d}{\lambda} (\sin \Delta - \sin \Delta_0) \right] \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \Delta + \sin \Delta_0) \right]}{\sin \left[\frac{8\pi d}{\lambda} (\sin \Delta + \sin \Delta_0) \right] \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \Delta - \sin \Delta_0) \right]},$$

где $F(\Delta, \Delta_0)$ – ДН решетки из 8 элементов, Δ – угол места, Δ_0 – направление максимума ДН. Например, при $\Delta_0 = \pm 12^\circ$, $\Delta = 7.5^\circ$ или 16.5° , что соответствует использованию двух ближайших к горизонту зеркальных лучей, $\gamma \approx 15$ дБ. Значение величины γ учитывалось при определении результирующих ошибок измерения модуля и фазы коэффициентов отражения от земли. На выходе двухканального приемника раздельно регистрировались отношение амплитуд отраженной и падающей волн для горизонтальной (h) и вертикальной (v) поляризации, что соответствует мо-

дулю $|\bar{R}_{h,v}|$, и разность фаз $\varphi_{h,v}$ тех же волн, связанных с $\arg \bar{R}_{h,v}$ соотношением

$$\arg \bar{R}_{h,v} = \varphi_{h,v} + \frac{4\pi H}{\lambda} \sin \Delta,$$

где $H = 54$ м – высота фазового центра решетчатой антенны из 8 нижних элементов.

Ниже приводятся результаты измерений, проведенных на радиотрассе Москва – Краснодар протяженностью 1200 км на частоте 15 МГц. Наблюдались моды 1E ($\Delta = 7.5^\circ$) и 1F2 ($\Delta = 16.5^\circ$). В первом случае получены значения $\bar{R}_h = 0.97 \exp(i176^\circ)$ и $\bar{R}_v = 0.6 \exp(i206^\circ)$, во втором – $\bar{R}_h = 0.86 \exp(i163^\circ)$ и $\bar{R}_v = 0.58 \exp(i255^\circ)$. Эти результаты с учетом измерительных ошибок отражены на рис. 1, верхняя половина которого иллюстрирует зависимость $|\bar{R}_{h,v}(\Delta)|$, нижняя – $\arg \bar{R}_{h,v}(\Delta)$. Объяснить наблюдаемые значения $\bar{R}_v(\Delta)$ моделью однородной земли, сухой ($\bar{\epsilon} = 4 - i4$) или увлажненной ($\bar{\epsilon} = 30 - i100$) (пунктирные линии на рисунке), невозможно; приведенные зависимости $\bar{R}_v(\Delta)$ для земли любой влажности заметно расходятся с результатами эксперимента. Это подтверждается расчетами $\bar{R}_v(\Delta)$ для любых значений $\bar{\epsilon}$ из интервала $\epsilon = 4 \div 30$ и $60 \sigma \lambda = 4 \div 100$ ($\sigma = 3 \div 80$ мСм/м). Кривые $\bar{R}_h(\Delta)$ для горизонтально поляризованного поля не являются показательными вследствие слабой чувствительности к параметрам подстилающей поверхности.

Использование модели двухслойной земли позволило согласовать расчетные кривые (сплошные линии на рисунке) с измеренными значениями $\bar{R}_v(\Delta)$ при углах места 7.5° и 16.5° . Верхний слой толщиной h моделировался сухой землей ($\bar{\epsilon}_1$), нижний, полубесконечный, достаточно влажной ($\bar{\epsilon}_2$). Расчет эффективного коэффициента отражения выполнялся по формуле [10]:

$$\bar{R}_{eff}(\Delta) = \frac{\bar{R}_1 + \bar{R}_2 \exp\left(-i \frac{4\pi h}{\lambda} \sqrt{\bar{\epsilon}_1 - \cos^2 \Delta}\right)}{1 + \bar{R}_1 \bar{R}_2 \exp\left(-i \frac{2\pi h}{\lambda} \sqrt{\bar{\epsilon}_1 - \cos^2 \Delta}\right)},$$

где \bar{R}_1 – коэффициент отражения от верхнего слоя почвы; \bar{R}_2 – коэффициент отражения волны, прошедшей верхний слой, от нижнего слоя почвы. Наилучшее согласие с экспериментом получилось при $\bar{\epsilon}_1 = (4 \pm 1) - i(4 \pm 1)$,

$h = 0.9 \pm 0.2$ м, $\bar{\epsilon}_2 = (30 \pm 5) - i(100 \pm 20)$, что и отражено на рис.1 кривыми $\bar{R}_v(\Delta)$ при $h = 0.7; 0.9; 1.1$ м. Отметим, что графики $\bar{R}_h(\Delta)$ при $h = 0.9$ м также соответствуют наблюдаемым значениям.

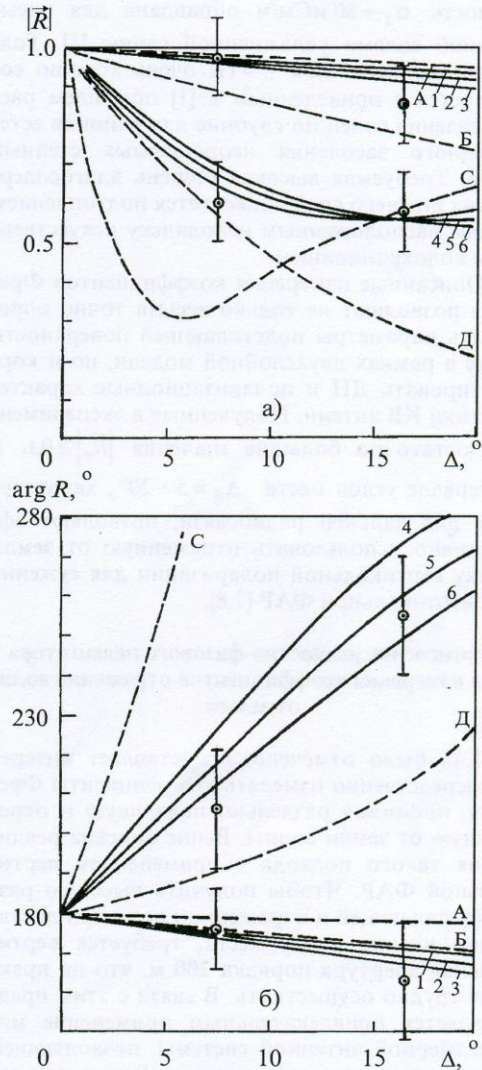


Рис. 1. Зависимости от угла места модулей $|\bar{R}_{h,v}|$ (а) и аргументов $\arg \bar{R}_{h,v}$ (б) коэффициентов Френеля горизонтально (А, Б, 1, 2, 3) и вертикально (С, Д, 4, 5, 6) поляризованных волн для однослойной модели земли (пунктирные линии: А, С – $\epsilon = 30 - i100$; Б, Д – $\epsilon = 4 - i4$) и двухслойной модели земли с комплексной диэлектрической проницаемостью верхнего слоя $\epsilon = 30 - i100$ (сплошные линии). Цифры у кривых для двухслойной модели земли соответствуют глубине верхнего слоя почвы: 1, 4 – 0.7 м; 2, 5 – 0.9 м; 3, 6 – 1.1 м (нижний слой – полубесконечный)

Таким образом, совпадение расчета и эксперимента достигается в данном случае только для двухслойной земли, причем приведенный выше диапазон изменения параметров $\bar{\epsilon}_1$, h , $\bar{\epsilon}_2$ весьма мал. Значение $\bar{\epsilon}_1 = 4 - i4$ характерно для сухой почвы, а достаточно высокая проводимость $\sigma_2 \approx 80$ мСм/м оправдана для насыщенной солями увлажненной глины [1]. Толщина верхнего слоя $h \approx 1$ м очень хорошо согласуется с приведенным в [1] профилем распределения солей по глубине для районов естественного засоления неорошаемых степных почв. Требуемая высокая степень влагосодержания нижнего слоя объясняется подтоплением почвы расположенным неподалеку искусственным водохранилищем.

Описанные измерения коэффициентов Френеля позволяют не только весьма точно определять параметры подстилающей поверхности даже в рамках двухслойной модели, но и корректировать ДН и поляризационные характеристики КВ антенн. Полученные в эксперименте достаточно большие значения $|\bar{R}_v| \geq 0.6$ в интервале углов места $\Delta_0 = 5 \div 20^\circ$, характерных для дальней радиосвязи, позволяют эффективно использовать отраженную от земли волну вертикальной поляризации для сужения ДН вертикальной ФАР [7,8].

Применение разностно-фазового пеленгатора для измерения коэффициентов отражения волн от земли

Как было отмечено, представляет интерес непосредственно измерять коэффициенты Френеля, принимая раздельно падающую и отраженную от земли волны. Выше описана реализация такого подхода с применением вертикальной ФАР. Чтобы получить высокую развязку падающей и отраженной волн при достаточно низких углах места, требуется вертикальная апертура порядка 200 м, что на практике трудно осуществить. В связи с этим представляется привлекательным применение малоразмерной антенной системы, позволяющей раздельно принять два сигнала. В качестве такой системы был использован интерферометр (разностно-фазовый пеленгатор), антенны которого представляли собой два коротких вертикальных диполя, разнесенных по высоте на расстояние $\Delta h = 5$ м.

Для надежного подавления падающей и отраженной волн, углы прихода которых над горизонтом равны $\pm \Delta_0$, необходимо обеспечить высокую идентичность двухканального устройства, состоящего помимо антенных элементов из двух магистральных кабелей, двух приемных устройств и двух схем разностно-

фазовой компенсации. Амплитудно-фазовые ошибки, влияющие на глубину интерференционного минимума и связанные с фидерной и приемно-измерительной системами, могут быть в процессе калибровки легко доведены до 1% и 1° соответственно. Поэтому основную погрешность вносит различие коэффициентов передачи антенных элементов, определяющееся их выходными импедансами, которые зависят от высоты размещения вибраторов над землей и описываются следующими выражениями, справедливыми при малых высотах подвеса коротких вибраторов [11]:

$$Z_1 = Z_{11} + \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon} + 1} (Z'_{11} + Z'_{12}) + Z_{12}, \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_{22} + \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon} + 1} (Z'_{22} + Z'_{21}) + Z_{21}, \quad (2)$$

где $Z_{11} = Z_{22}$ – импеданс вибратора в свободном пространстве; $Z_{12} = Z_{21}$ – взаимный импеданс двух вибраторов; $Z'_{11(22)}$ – взаимный импеданс 1-го (2-го) вибратора и его зеркального изображения; $Z'_{12(21)}$ – взаимный импеданс 1-го (2-го) вибратора и зеркального изображения 2-го (1-го) вибратора.

Расчеты по формулам (1) и (2) при размере вибраторов $l = 2$ м, $\lambda = 30$ м, $h_1 = 2$ м, $h_2 = 7$ м, $\epsilon = 20$ и $\sigma = 49$ мСм/м дают $Z_1 = -(58 + i2827)$ Ом, $Z_2 = -(45 + i2444)$ Ом. Следовательно вибраторы имеют большой реактивный импеданс емкостного характера. Для максимизации коэффициентов передачи $K_{1,2}$ коротких антенных элементов при работе на нагрузку $W = 75$ Ом использована трансформация импеданса с помощью широкополосного трансформатора $n:1$, где n – коэффициент трансформации. В этом случае выражения для $K_{1,2}$, как нетрудно показать, имеют вид:

$$K_{1,2} = \frac{C_{1,2}}{C_{1,2} + C_0} \frac{nW}{\sqrt{n^4 W^2 + X_{1,2}^2}}. \quad (3)$$

Здесь $X_{1,2} = 1/\omega(C_{1,2} + C_0)$, $C_{1,2}$ – эквивалентная емкость вибраторов, $C_0 \approx 15$ нФ – паразитная конструктивная емкость. Как следует из соотношения (3), существует оптимальный коэффициент трансформации $n_{opt} = \sqrt{X_{1,2}/W}$, обеспечивающий максимум $K_{1,2}$. При выбранном $n = 5$ отношение максимизированных коэффициентов передачи K_1/K_2 антенных элементов, рассчитанное по формуле (3), равно

0.91, что приводит к уменьшению глубины пеленгационного минимума до величины -21 дБ, характеризующей развязку двух принимаемых сигналов. Заметим, что если бы можно было обеспечить $\Delta h = 7.5$ м (что соответствует $\Delta h = \lambda/4$ при $\lambda = 30$ м) вместо $\Delta h = 5$ м, то $Z_1 = Z_2$, $K_1 = K_2$ и уменьшения величины пеленгационного нуля не будет наблюдаться.

Кроме упомянутой выше причины, развязка двух каналов ухудшается, если угол места выделяемого сигнала не совпадает с максимумом пеленгационной диаграммы направленности. Колебания напряжения на выходах каналов падающей и отраженной волн, соответствующие выделяемому сигналу и нормированные на амплитуду падающей волны, имеют вид:

$$U(t) = \sin(\omega t \pm \Delta\varphi) - \sin(\omega t \mp \Phi),$$

где верхние знаки соответствуют отраженной волне, нижние – падающей; $\Delta\varphi = 2\pi(\Delta h/\lambda)\sin\Delta_0$; Φ – фазовый сдвиг, вносимый в канал верхней антенны. Если $\Phi = \Delta\varphi$, то $U(t) = 2\sin\Delta\varphi\cos\omega t$, а максимум огибающей достигается при $\Delta\varphi = \pi/2$ или $\Delta h = \lambda/4\sin\Delta_0$. В проведенном эксперименте угол места принимаемого сигнала $\Delta_0 = 35^\circ$, $\Delta h = 5$ м, поэтому ослабление сигнала относительно максимума пеленгационной диаграммы направленности составляет $\sin\Delta\varphi \approx 0.57$ или 5 дБ. Таким образом, с учетом обоих факторов результирующая развязка каналов падающей и отраженной волн равна $21 - 5 = 16$ дБ и учитывается при оценке ошибок измерения \bar{R} .

Для однозначного определения модуля и фазы коэффициента отражения от земли необходимо получить выражение для отношения комплексных выходных напряжений каналов отраженной (\bar{U}_R) и падающей (\bar{U}_I) волн разностно-фазового пеленгатора \bar{U}_R/\bar{U}_I при $\Phi = \Delta\varphi$. Нормированные на амплитуду падающей волны сигналы на выходах каждой из антенн формируются суммой падающей и отраженной волн и имеют следующий вид (множители $e^{i\omega t}$ опущены):

$$\bar{U}_I = 1 + R e^{i(\varphi_R - \varphi_1)}, \quad \bar{U}_2 = e^{-i\Delta\varphi} + R e^{i(\varphi_R - \varphi_2)},$$

где $\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}h_1\sin\Delta_0$, $\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(h_1 + h_2)\sin\Delta_0$, $h_{1,2}$ – высоты вибраторов над поверхностью земли, R и φ_R – модуль и фаза коэффициента Френеля. После введения компенсирующего сдвига фазы $\Phi = \Delta\varphi$ и вычитания получим:

$$\bar{U}_R = \bar{U}_1 e^{-i\Delta\varphi} - \bar{U}_2 = R e^{i(\varphi_R - \varphi_2)} (e^{-i2\Delta\varphi} - 1),$$

$$\bar{U}_I = \bar{U}_2 e^{i(\varphi_R - \varphi_2)} - \bar{U}_1 = e^{-i2\Delta\varphi} - 1,$$

$$\frac{\bar{U}_R}{\bar{U}_I} = R e^{i(\varphi_R - \varphi_2)}.$$

Как следует из последнего выражения, отношение огибающих на выходах компенсатора равно модулю R коэффициента Френеля, а разность фаз

$$\Delta\varphi_m = \varphi_R - \varphi_2, \text{ т. е. } \varphi_R = \Delta\varphi_m + \frac{2\pi}{\lambda}(h_1 + h_2)\sin\Delta_0.$$

Измерения коэффициента отражения от земли сигнала с вертикальной поляризацией проводились на территории обсерватории РИ НАН Украины. Для определения угла места принимаемого сигнала (трасса Москва – Харьков, радиостанция РВМ, $\lambda = 30$ м) использовалось пеленгование узким лучом радиотелескопа УТР-2 [12], имеющего ширину диаграммы направленности в вертикальной плоскости $\approx 2^\circ$, что позволило установить $\Delta_0 = 35^\circ$. В процессе проведения эксперимента контролировался модовый состав принимаемого поля с помощью доплеровского анализатора спектра на основе СКЧ-72. Для определения коэффициента Френеля выбирались интервалы времени, когда наблюдался однолучевой сигнал. Измеренные на выходе разностно-фазового пеленгатора значения $R = 0.8 \pm 0.07$ и $\varphi_R = 332^\circ \pm 20^\circ$ хорошо соответствуют модулю (0.76) и фазе (347°) коэффициента отражения от земли вертикально поляризованного поля, рассчитанного для однородной почвы с параметрами $\epsilon = 20$, $\sigma = 49$ мСм/м. Последние величины получены при определении параметров подстилающей поверхности методом измерения ослабления вертикальной компоненты поверхностной волны, описанным ниже.

Антенные решетки радиотелескопа УТР-2 состоят из горизонтально поляризованных элементов, однако можно получать значения коэффициента Френеля \bar{R}_h для сигнала горизонтальной поляризации по измеренным значениям \bar{R}_v с помощью пересчета $\bar{R}_v \Rightarrow \bar{\epsilon} \Rightarrow \bar{R}_h$, достаточно корректного в случае однородной земли. Заметим, что описанным выше образом можно непосредственно измерять и \bar{R}_h , заменив вертикальные вибраторы пеленгатора горизонтальными. Однако \bar{R}_h в диапазоне углов места $0 \div 30^\circ$ слабо меняется при изменении $\bar{\epsilon}$ подстилающей поверхности и поэтому является плохим индикатором состояния почвы. Имеющее место в данном эксперименте хорошее сов-

падение с результатами метода, основанного на измерении ослабления поверхностной волны, объясняется большой проводимостью земли, уменьшающей глубину проникновения волны в почву до величины ≈ 1 м, что оправдывает предположение об ее однородности в указанном высотном интервале. Отметим также, что в отсутствие высоконаправленной антенны для определения вертикальных углов прихода можно использовать разностно-фазовый пеленгатор, имеющий два приемных диполя, разнесенных вдоль направления распространения волны.

Использование поверхностной волны для измерения диэлектрической проницаемости земли

Предлагаемые ниже два метода базируются на строгих расчетах ортогональных компонент поля поверхностной волны в ближней зоне.

Задача расчета полей земной волны привлекает внимание уже в течение почти ста лет. Начиная с работ Ценнека, Зоммерфельда, Вандер-Поля и многих других авторов, ей посвящено множество статей и монографий, среди которых монография Бреховских [13] отличается особенной полнотой. В ней детально исследованы все особенности задачи и приведена полная классификация излучаемых волн. Тем не менее поиск простых и эффективных методов расчета полей продолжается вплоть до настоящего времени, что связано с совершенствованием вычислительных средств и методов вычислений.

Так, в работе Дворака [14] было предложено использовать для расчета зоммерфельдовских интегралов быстрое преобразование Фурье, а в цикле работ финских авторов [15-18] – представление отраженной волны фиктивными зеркальными источниками.

Предлагаемый нами подход основан на прямом вычислении интегралов Зоммерфельда, предварительно преобразованных с целью обеспечения их быстрой сходимости. Информация о методе была опубликована в [6], поэтому здесь подробно не приводится.

Основная цель метода – расчет полей при сравнительно небольших удалениях от источников (порядка $1 \div 10^3 \lambda$). При больших расстояниях удобны полученные в [6] асимптотические формулы. Не повторяя полностью содержания [6], приведем исходные выражения для электрических полей вертикального и горизонтального диполей малой длины $L \ll \lambda$ с токами I . Диполи поместим в точку $(0,0,h)$, поверхность раздела совместим с плоскостью $z=0$. Все линейные размеры домножим на $k = 2\pi/\lambda$. При $z > 0$ среда – вакуум ($\epsilon = 1$), при $z < 0$ – полупроводящая среда $\bar{\epsilon} = \epsilon + i60\sigma\lambda$.

Тогда для вертикального диполя вертикальная E_z и радиальная E_ρ компоненты поля равны:

$$E_z = A \left\{ \frac{e^{iR_i}}{R_i} \left[1 + \frac{i}{R_i} - \frac{1}{R_i^2} - \left(\frac{z_i}{R_i} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{3i}{R_i} - \frac{3}{R_i^2} \right) - \frac{e^{iR}}{R} \left[1 + \frac{i}{R} - \frac{1}{R^2} - \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{3i}{R} - \frac{3}{R^2} \right) + 2\bar{\epsilon}S_2 \right\},$$

$$E_\rho = Ax \times \left[-\frac{e^{iR_i}}{R_i} \frac{\rho z_i}{R_i^2} \left(1 + \frac{3i}{R_i} - \frac{3}{R_i^2} \right) + \frac{e^{iR}}{R} \frac{\rho z}{R^2} \left(1 + \frac{3i}{R} - \frac{3}{R^2} \right) + 2\bar{\epsilon}S_3 \right].$$

Для горизонтального диполя, ориентированного вдоль оси OX , существуют все три компоненты электрического поля:

$$E_x = A \left\{ \frac{e^{iR_i}}{R_i} \left[1 + \frac{i}{R_i} - \frac{1}{R_i^2} - \left(\frac{x}{R_i} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{3i}{R_i} - \frac{3}{R_i^2} \right) - \frac{e^{iR}}{R} \left[1 + \frac{i}{R} - \frac{1}{R^2} - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{3i}{R} - \frac{3}{R^2} \right) + 2S_1 - 2 \left(\frac{x}{\rho} \right)^2 S_2 - \frac{2}{\rho} \left(1 - 2 \frac{x^2}{\rho^2} \right) S_4 \right\},$$

$$E_y = -Ax y \times \left[\frac{e^{iR_i}}{R_i^3} \left(1 + \frac{3i}{R_i} - \frac{3}{R_i^2} \right) - \frac{e^{iR}}{R^3} \left(1 + \frac{3i}{R} - \frac{3}{R^2} \right) + \frac{2}{\rho^2} S_2 - \frac{4}{\rho^3} S_4 \right],$$

$$E_z = Ax \left[\frac{e^{iR_i}}{R_i} \frac{z_i}{R_i^2} \left(1 + \frac{3i}{R_i} - \frac{3}{R_i^2} \right) - \frac{e^{iR}}{R} \frac{z}{R^2} \left(1 + \frac{3i}{R} - \frac{3}{R^2} \right) + \frac{2}{\rho} S_3 \right].$$

Здесь $\rho^2 = x^2 + y^2 = (2\pi r/\lambda)^2$, $z_i = |h - h_i|$, $z = h + h_i$, $R_i^2 = \rho^2 + z_i^2$, $R^2 = \rho^2 + z^2$, $A = -i30ILk^2$, S_i – интегралы Зоммерфельда.

$$S_1 = \int_0^\infty J_0(v\rho) e^{-lz} \frac{v dv}{l+m}; \quad S_2, S_3, S_4 - \text{частные}$$

$$\text{производные интеграла } S_0 = \int_0^\infty J_0(v\rho) e^{-lz} \frac{v dv}{\bar{\epsilon}l+m};$$

$$S_2 = -\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} + \frac{\partial}{\partial \rho} \right) S_0, \quad S_3 = \frac{\partial^2}{\partial \rho \partial z} S_0, \quad S_4 = -\frac{\partial}{\partial \rho} S_0,$$

$$l = \sqrt{v^2 - 1}, \quad m = \sqrt{v^2 - \bar{\epsilon}} \quad (\operatorname{Re} l, \operatorname{Re} m \geq 0).$$

Можно развить метод расчета полей с целью учета вертикальной стратификации нижнего полупространства. Для этого следует множители $(l+m)^{-1}$ и $(\bar{\epsilon}l+m)^{-1}$ в интегралах Зоммерфельда выразить через коэффициенты отражения плоской волны от слоистой поверхности [19]. Например, если нижнее полупространство – двухслойное, с верхним слоем толщиной d и с диэлектрической проницаемостью $\bar{\epsilon}_1$ и нижним полубесконечным слоем с $\bar{\epsilon}_2$, то вместо множителя $(\bar{\epsilon}_1 l + m)^{-1}$ в интегралах S_2, S_3, S_4 следует взять выражение:

$$\frac{1}{\bar{\epsilon}l + m_1} \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}_2 m_1 - \bar{\epsilon}_1 m_2}{\bar{\epsilon}_2 m_1 + \bar{\epsilon}_1 m_2} e^{-4\pi d m_1 / \lambda} \right) \times$$

$$\times \left(1 + \frac{\left(\frac{\bar{\epsilon}_2 m_1 - \bar{\epsilon}_1 m_2}{\bar{\epsilon}_2 m_1 + \bar{\epsilon}_1 m_2} \right) \left(\frac{\bar{\epsilon}_1 l - m_1}{\bar{\epsilon}_1 l + m_1} \right) e^{-4\pi d m_1 / \lambda}}{\left(\frac{\bar{\epsilon}_2 m_1 - \bar{\epsilon}_1 m_2}{\bar{\epsilon}_2 m_1 + \bar{\epsilon}_1 m_2} \right) \left(\frac{\bar{\epsilon}_1 l - m_1}{\bar{\epsilon}_1 l + m_1} \right)} \right)^{-1},$$

$$\text{где } m_1 = \sqrt{v^2 - \bar{\epsilon}_1}, \quad m_2 = \sqrt{v^2 - \bar{\epsilon}_2}.$$

Данная методика позволяет рассчитать поля над плоской границей раздела двух сред, в том числе, при слоисто-неоднородном нижнем полупространстве. Приведенные в [6] формулы обеспечивают высокую скорость и точность вычислений при использовании простых персональных ЭВМ для любых удалений от источника и при любых параметрах среды. Однако при $r/\lambda < 0.5$ в реальных излучателях следует учитывать более тонкие эффекты (толщину вибратора, вид его узла питания и т. п.). В этом случае рекомендуется следовать работе [20].

Предлагаемый метод определения характеристик земной поверхности с использованием результатов приведенных выше расчетов компонент полей вертикального и горизонтального диполей был апробирован в обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины. Экспериментальная установка состояла из двух пар ортогональных вибраторов длиной 2 м каждый, ориентированных под углом 45° к горизонту. Линия, соединяющая две скрещенные антенны, перпендикулярна вертикальной плоскости, в которой расположены вибраторы. Расстояние между парами антенн 67 м, высота их фазовых центров 4.5 м. С помощью четырех магистральных кабелей одна пара подключалась к выходу генератора излучаемого сигнала

(синтезатор частоты Ч6-58), а вторая пара антенн через сумма-разностное устройство – ко входам двухканального когерентного радиоприемного устройства (РПУ), состоящего из двух РПУ Р-160П. Суммирование и вычитание токов приемных антенн A_2 и B_2 необходимо для получения вертикальной E_z и радиальной E_ρ составляющих принимаемого поля с помощью наклонно ориентированных вибраторов. Генератор и РПУ синхронизировались рубидиевым стандартом частоты Ч1-69. Установленные на выходах РПУ цифровые измерители амплитуды и разности фаз позволяли регистрировать интересующие нас значения E_z и E_ρ . Процедура измерения последних величин заключалась в излучении сигнала вибратором A_1 или B_1 . При этом в точке излучения формировалось линейно поляризованное поле, которое можно представить в виде двух равноамплитудных и синфазных вертикальной и горизонтальной компонент. Измеренное на выходах РПУ отношение комплексных амплитуд соответствует фазу $E_z/E_\rho = E \exp(i\phi)$ поля поверхностной волны в точке приема. Переход от излучателя A_1 к излучателю B_1 приводит к изменению фазы ϕ на 180°. Для повышения точности определения величины E_z/E_ρ , помимо замены излучающего вибратора, меняли местами точки излучения и приема с последовательной запиткой диполей A_2 и B_2 . Результаты всех четырех экспериментов усреднялись.

Для однозначного восстановления ϵ и σ подстилающей поверхности измерялась частотная зависимость E и ϕ в диапазоне $f = 20 \div 50$ МГц. Экспериментальные кривые $E(f)$ и $\phi(f)$ сопоставлялись с расчетными зависимостями этих величин с помощью метода наименьших средних квадратов. В результате ϵ и σ находились независимо по кривым $E(f)$ и $\phi(f)$, а полученные значения усреднялись.

На рис. 2 приведены экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные) зависимости $E(f)$ и $\phi(f)$ для разных значений ϵ и σ (кривая 1 – $\epsilon = 3$, $\sigma = 10$ мСм/м; кривая 2 – $\epsilon = 5$, $\sigma = 14$ мСм/м; кривая 3 – $\epsilon = 15$, $\sigma = 35$ мСм/м). Как следует из расчетных кривых $\phi(f)$, наиболее сильно влияние земли на аргумент E_z/E_ρ проявляется на высоких частотах 35–50 МГц, тогда как модуль $|E_z/E_\rho|$ лучше “чувствует” землю на более низких частотах 20–35 МГц. Применение метода наименьших средних квадратов позволяет опреде-

лить из зависимости $\phi(f)$ значения $\epsilon=5$, $\sigma=14$ мСм/м, а из $E(f)$ – значения $\epsilon=3$, $\sigma=10$ мСм/м, следовательно средние значения в данном эксперименте $\epsilon=4$, $\sigma=12$ мСм/м.

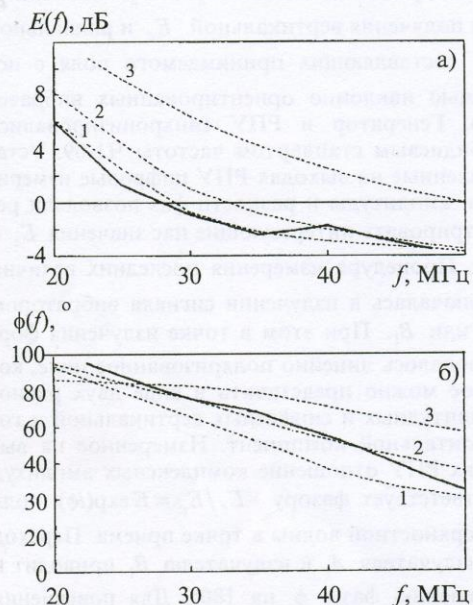


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные) зависимости от частоты модуля E (а) и фазы ϕ (б) отношения комплексных амплитуд вертикальной и горизонтальной компонент принимаемого поля для разных значений диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ (кривая 1 – $\epsilon=3$, $\sigma=10$ мСм/м; кривая 2 – $\epsilon=5$, $\sigma=14$ мСм/м; кривая 3 – $\epsilon=15$, $\sigma=35$ мСм/м)

Полученные значения параметров подстилающей поверхности сравнивались с результатами определения ϵ и σ посредством измерения ослабления поля земной волны вертикальной поляризации на двух удалениях от излучателя. Восстановленные с помощью этого, описанного ниже, метода, значения $\epsilon=3$, $\sigma=14$ мСм/м хорошо согласуются с полученными в приведенном эксперименте значениями $\epsilon=4$, $\sigma=12$ мСм/м.

Еще один метод определения параметров земли заключается в измерении амплитудно-фазовых и поляризационных характеристик поля поверхностной волны, излучаемой вертикальным диполем. Наиболее целесообразными являются следующие подходы:

1. Относительное измерение амплитуды и фазы вертикальной компоненты поля на двух удалениях от источника.

2. Относительное измерение амплитуд и фаз вертикальной и продольной горизонтальной

компонент поля в одной точке (измерение продольной поляризации поверхностной волны).

Первый способ применяется достаточно давно для определения проводимости σ в диапазонах длинных и средних волн [1], когда используются только измерения амплитуды и приближенные решения для полей при $60\sigma\lambda \gg \epsilon$ и $r/\lambda \gg 1$ (r – расстояние до излучателя). В декаметровом диапазоне волн подобный подход неприменим, поскольку первое неравенство обычно не выполняется, а при использовании больших относительных расстояний r/λ фактор слоистости почвы становится малозаметным [2]. С точки зрения влияния земли на параметры антенн именно масштабы $r/\lambda \approx 1$ являются наиболее существенными, что соответствует в указанном диапазоне волн удалению точки наблюдения на десятки и сотни метров.

Второй способ применительно к декаметровому диапазону описан в [2]. Здесь соотношение между ϵ и $60\sigma\lambda$ может быть произвольным, однако используются упрощенные выражения для ϵ и σ при $r/\lambda \approx 10 \div 20$ и $h_{1,2} = 0$ ($h_{1,2}$ – высоты точек излучения и приема):

$$\epsilon = \left| \frac{E_z}{E_p} \right|^2 \cos 2\eta, \quad \sigma = \left| \frac{E_z}{E_p} \right|^2 \frac{\sin 2\eta}{60\lambda}, \quad (4)$$

где E_z/E_p – отношение амплитуд вертикальной и продольной горизонтальной компонент поля поверхностной волны, η – разность их фаз. Требование сравнительно больших значений r/λ затрудняет, как и выше, выявление степени слоистости почвы. Ограничивает применение этого метода и условие $h_{1,2} = 0$. Реально точка приема может быть расположена на высоте $h_{1,2} \geq 2$ м и, как будет показано ниже, сравнение результатов расчета в соответствии с (4) и строгих расчетов компонент поля поверхностной волны при $h_{1,2} \neq 0$ показывает достаточно заметные отличия.

Предлагаемый здесь метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости земной поверхности заключается в измерении только отношения амплитуд E_{z2}/E_{z1} поля вертикальной компоненты поверхностной волны в двух точках на расстояниях $r_1 \approx \lambda$ и $r_2 \approx 10\lambda$ от вертикального излучателя. Оригинальность такого подхода, реализованного в диапазоне коротких волн, заключается в применении строгих выражений [6] для поля поверхностной волны при любых ϵ , σ , $h_{1,2}$, r , в том числе и при $r \leq \lambda$.

Для нахождения двух величин ϵ и σ необходимы измерения как отношения амплитуд, так и разности фаз сигналов, наведенных полем поверхностной волны в приемных диполях. Определение разности фаз с требуемой точностью $\cong 1^\circ$ представляет известные трудности, поэтому для однозначного восстановления ϵ и σ в отсутствие фазовых измерений применялась регистрация отношения амплитуд поля на двух-трех достаточно отличающихся частотах. Использование набора частот не приводит к появлению методических ошибок, поскольку в диапазоне 15÷50 МГц заметной дисперсии величин ϵ и σ нет [21].

Как было отмечено, для реализации метода необходимо иметь точные расчеты поля в зависимости от ϵ , σ , λ , $h_{1,2}$ и r . Приближенные данные о таких зависимостях могут быть получены с использованием графиков, рассчитанных Нортоном [22]. Для получения более точных данных были использованы кратко описанные выше расчеты на основе интегралов Зоммерфельда. При этом можно учесть многослойность почвы, что реально имеет место из-за присутствия подпочвенной влаги и промерзания поверхностного слоя.

Данный метод в качестве базового был использован для оперативного определения ϵ и σ подстилающей поверхности с последующим уточнением эффективной площади антенных решеток радиотелескопа УТР-2 Радиоастрономического института НАН Украины. Рядом с решетками были установлены три вертикальных несимметричных диполя высотой 1.4 м на расстояниях $r_1 = 15$ м и $r_2 = 200$ м, соединенные с измерительной установкой магистральными кабелями длиной 400 м, уложенными в землю. Установка состояла из РПУ Р-160П, синтезатора для формирования излучаемого сигнала в диапазоне частот 15÷50 МГц и сигнала опорной частоты 128 кГц; цифровых вольтметра и фазометра, работающих на промежуточной частоте 128 кГц, и электронного коммутатора. Последний применялся для быстрого подключения входа РПУ к выходам магистральных кабелей двух приемных диполей.

Фазометр необходим для реализации второго способа определения $\bar{\epsilon}$, в котором мы использовали короткие скрещенные вибраторы, размещенные на расстоянии 200 м от излучающего диполя на высоте 2 м над землей. Второй способ с измерением продольной поляризации поверхностной волны являлся дополнительной проверкой первого. В этом случае коммутатор располагался непосредственно под скрещенными вибраторами, ориентированными под углом 45° к горизонту. Выход коммутатора соединен с одним из магистральных кабелей, что позволило при быстром переключении

устранить амплитудно-фазовые ошибки, связанные с фидерной и приемно-измерительными системами. Переход к вертикальной и горизонтальной поляризациям осуществлялся суммированием и вычитанием токов наклонных вибраторов с помощью широкополосного сумма-разностного устройства, установленного между выходами вибраторов и коммутатором.

Для удобства использования первого и второго способов были рассчитаны зависимости E_{z_1}/E_{z_2} и \bar{E}_z/\bar{E}_p от ϵ , σ и λ для случая однослойной земли при заданных расстояниях между вибраторами и высотах размещения их фазовых центров над землей. Искомые значения ϵ и σ определялись в первом способе точкой пересечения расчетных кривых равных отношений амплитуд для каждой из частот, построенных на плоскости ϵ , σ . На рис. 3 показан пример такого построения для частот 15, 30 и 50 МГц. Точки пересечения трех кривых

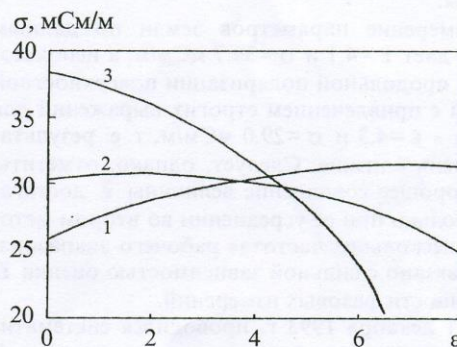


Рис. 3. Определение диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ при помощи расчетных кривых равных отношений амплитуд на трех частотах:

кривая 1 — $f = 15$ МГц, $|E_{z_1}/E_{z_2}| = 26.3$ дБ;

кривая 2 — $f = 30$ МГц, $|E_{z_1}/E_{z_2}| = 34.3$ дБ;

кривая 3 — $f = 50$ МГц, $|E_{z_1}/E_{z_2}| = 41.8$ дБ

сгруппированы в достаточно узкой области $\Delta\sigma/\sigma \cong 4\%$, $\Delta\epsilon/\epsilon \cong 6\%$. Эти величины характеризуют ошибки определения ϵ и σ , связанные, в основном, с погрешностью ± 0.1 дБ амплитудных измерений. Близость точек пересечения свидетельствует также о выполнении допущения об однослойности почвы в месте проведения эксперимента и об отсутствии дисперсии ϵ и σ в указанном диапазоне частот. При часто наблюдающихся в наших условиях значениях $\epsilon \geq 10$, $\sigma \geq 20$ мСм/м и $\lambda \leq 20$ м толщина

скин-слоя на использовавшихся частотах вблизи поверхности земли невелика (порядка 1 м), что облегчает использование модели однородной по глубине земли. В случае более сухих почв ($\epsilon < 5$, $\sigma < 10$ мСм/м) толщина скин-слоя возрастает до 3÷5 м и стратификация подстилающей поверхности в таком вертикальном интервале может быть заметно выражена, что потребует использования модели двухслойной земли.

Для проведения систематического контроля параметров грунта вместо графического способа определения $\bar{\epsilon}$ разработана программа для ЭВМ IBM PC, позволяющая оценить ϵ и σ по измеренным значениям E_{z_1}/E_{z_2} на трех частотах. Подобная программа использована и в методе измерения продольной поляризации. Сравнение результатов определения ϵ и σ при помощи приближенных выражений (4) и строгих соотношений для поля земной волны показало заметное отличие в оценке ϵ , достигающее до 40% при $\epsilon \leq 10$ и связанное, в частности, с учетом реальной высоты точки наблюдения $h = 2$ м.

Измерение параметров земли по данным рис. 3 дает $\epsilon = 4.1$ и $\sigma = 30.7$ мСм/м, а использование продольной поляризации поверхностной волны с привлечением строгих выражений для полей – $\epsilon = 4.3$ и $\sigma = 29.0$ мСм/м, т. е. результаты очень близкие. Следует, однако, отметить, что хорошее совпадение величины $\bar{\epsilon}$ достигается только при ее усреднении во втором методе на нескольких частотах рабочего диапазона. Это связано с сильной зависимостью оценки $\bar{\epsilon}$ от точности фазовых измерений.

С 1 декабря 1993 г. проводился систематический контроль параметров подстилающей поверхности в месте расположения радиотелескопа УТР-2 с использованием первого метода и с последующим уточнением эффективной площади A_{eff} антенных решеток. На рис. 4 приведены изменения во времени σ (в мСм/м, сплошная линия), ϵ (сплошная линия) и A_{eff} (пунктирная линия) в относительных единицах на частоте 15 МГц. Минимальные значения ϵ и σ соответствуют мерзлой земле в зимних условиях и сухой земле летом, максимальные – весенним условиям, когда земля сильно увлажнена растаявшим снегом. Изменения A_{eff} сравнительно невелики ($\cong 10\%$), что объясняется для данной почвы высоким значением $|\bar{\epsilon}|$, приближающим эффективность решетки к идеальной, особенно при больших значениях углов места, применяемых в радиоастрономии. Тем не менее такое уточнение A_{eff} имеет большое значение при изучении переменности излучения космических радиисточников,

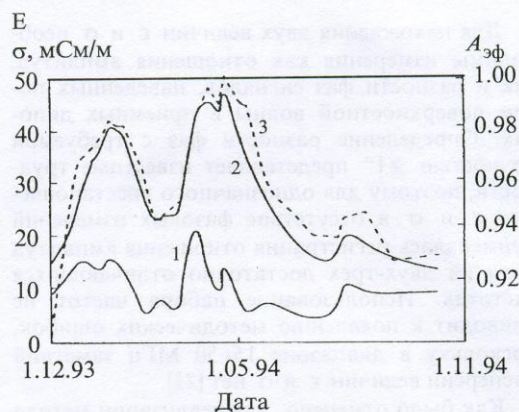


Рис. 4. Годичные вариации диэлектрической проницаемости ϵ (кривая 1), проводимости σ (кривая 2) и нормированной эффективной площади A_{eff} (кривая 3) радиотелескопа УТР-2

когда исследуются слабые флуктуации спектральной плотности потока. Расчеты показывают, что диапазон изменения A_{eff} возрастает до 30÷40% в случае размещения антенной решетки над сухой почвой при изменении погодных условий, приводящих к вариациям $\epsilon = 3\div 8$ и $\sigma = 1\div 10$ мСм/м.

Заключение

Использование описанных методов в обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины показало их высокую эффективность и оперативность. Определение текущих значений диэлектрической проницаемости ϵ , проводимости σ и нормированной эффективной площади A_{eff} занимает не более 2 минут при полной автоматизации процедуры измерений и обработки. Помимо уточнения A_{eff} радиотелескопа УТР-2 полученные значения ϵ и σ использовались нами для устранения искажений поляризации антенн декаметрового диапазона, связанных с разными значениями коэффициентов Френеля для волн вертикальной и горизонтальной поляризации. Влияние комплексной диэлектрической проницаемости земли на поляризацию антенн, состоящих из скрещенных диполей, велико в случае низких углов места, характерных для дальней радиосвязи. Поэтому измерение текущих значений ϵ и σ с последующим определением амплитудно-фазовых поправок к токам скрещенных вибраторов является необходимым для надежного функционирования систем с поляризационной селекцией типа описанной выше 15-эле-

элементной вертикальной ФАР [8].

Данная работа выполнялась при частичной финансовой поддержке грантов INTAS 97-1964, INTAS-CNES 97-1450.

Литература

1. В. Е. Кашпровский, Ф. А. Кузубов. Распространение средних радиоволн земным лучем. Москва, Связь, 1971, 220 с.
2. В. Е. Кашпровский. Экспериментальное исследование распространения радиоволн. Москва, Наука, 1980, 151 с.
3. В. В. Крымкин. Изв. ВУЗов. Радиопизика. 1971, **14**, №2, с. 302-308.
4. Л. Г. Содин, И. С. Фалькович. Радиотехника и электроника. 1995, **40**, №4, с. 562-565.
5. И. С. Фалькович, Н. Н. Калинин. Электросвязь. 1996, №2, с. 32-33.
6. Л. Г. Содин, И. С. Фалькович, Н. Н. Калинин. Радиотехника. 1997, **52**, №1, с. 95-102.
7. Ю. М. Брук, Л. Г. Содин, И. С. Фалькович и др. Электросвязь. 1993, №7, с. 17-18.
8. Yu. M. Bruck, G. A. Inyutin, I. S. Falkovich and L. G. Sodin. Journees Internationales sur les Antennes. 1992, **6**, pp. 637-639.
9. Ю. М. Брук, В. Ю. Ермаков, Л. Г. Содин. Радиотехника и электроника. 1990, **35**, №10, с. 2040-2044.
10. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. Москва, Наука, 1970, 532 с.
11. Б. В. Сосунов. Радиотехника. 1976, **31**, №6, с. 44-47.
12. С. Я. Брауде, А. В. Мень, Л. Г. Содин. В сб. "Антенны" под ред. А. А. Пистолькорса. Вып. 26, Москва, Связь, 1978, с.3-15.
13. Л. М. Бреховских. Волны в слоистых средах. Москва, Наука, 1973, 342 с.
14. S. L. Dvorak. IEEE Trans. Antennas Propag. 1992, **AP-40**, No. 7, pp. 798-805.
15. I. V. Lindell, E. Alanen. IEEE Trans. Antennas Propag. 1984, **AP-32**, No. 2, pp. 126-133.
16. I.V. Lindell, E. Alanen. IEEE Trans. Antennas Propag. 1984, **AP-32**, No. 8, pp. 841-847.
17. I. V. Lindell, E. Alanen. IEEE Trans. Antennas Propag. 1984, **AP-32**, No. 10, pp. 1027-1032.
18. I. V. Lindell, E. Alanen, K. Mannersalo. IEEE Trans. Antennas Propag. 1985, **AP-33**, No. 9, pp. 932-945.
19. J. M. Vigourex. Journ. Opt. Soc. Amer. Ser. A. 1991, **8**, No. 11, pp. 1697-1701.
20. С. Л. Рашковский. Изв. ВУЗов. Радиопизика. 1980, **23**, No. 7, с. 841-850.
21. Я. Л. Альперт. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. Москва, Наука, 1972, 563 с.
22. K. A. Norton. Proc. IRE. 1936, **24**, pp. 1367-1387.

Measurement of Substrate Parameters for Specification of Characteristics of Antennas Located Near the Earth's Surface

I. S. Falkovich, L. G. Sodin, N. N. Kalinichenko

Some new methods for measuring the substrate parameters with use of both volume, and surface HF radiowaves were considered. Their realization is based on application of the vertical antenna array, the UTR-2 radiotelescope and difference-phase bearing indicator. The measured values of complex dielectric constant allow to specify the effective area and polarization characteristics of antennas located near the earth's surface.