

Краткие сообщения

УДК 621.396.67

АНТЕННЫ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ВОЛН В РЕЖИМЕ ПРИЕМА

В.В. Крымский, М.Г. Вахитов

В статье рассматриваются характеристики антенн несинусоидальных волн (НСВ) в режиме приема. С использованием трех видов теоремы взаимности для импульсных полей показано, что пространственно-временные характеристики антенн в режимах передачи и приема разные, поскольку отличаются распределения токов на антенне в режимах передачи и приема. Предложены два подхода: для определения характеристик антенн НСВ в режиме приема необходимо найти пространственно-временное распределение тока на антенне в режиме приема; не проводить разделения характеристик антенн в режимах приема и передачи, а использовать одну приемно-передающую характеристику в виде соотношения их взаимной свертки.

Ключевые слова: антенна, теорема взаимности, электромагнитная волна.

Введение

В настоящее время увеличилось количество радиоэлектронных систем, которые работают на передачу в пространство и прием видеоимпульсных сигналов. Это устройства обычной и подповерхностной радиолокации, устройства постановки импульсных помех и т. д. Как правило, используются импульсы длительностью в единицы наносекунд и менее. Очень актуальной является задача расчета характеристик приемно-передающих антенн этих систем.

Для характеристики антенн этих систем существует ряд устоявшихся терминов: сверхширокополосные антенны, короткоимпульсные антенны, антенны несинусоидальных волн (антенны НСВ). Ниже мы будем использовать последний термин.

Постановка задачи

Задача приема электромагнитных волн должна быть сформулирована как задача нахождения распределения тока на излучателе под действием падающей импульсной электромагнитной волны. В случае синусоидальных колебаний эта задача решается следующим образом [1, 2]. Рассматриваются две антенны с входными сопротивлениями Z_{A1} и Z_{A2} . Поочередно каждая из антенн работает в режиме передачи. Используется принцип взаимности в виде

$$\frac{\varepsilon_1}{I_{12}} = \frac{\varepsilon_2}{I_{21}}. \quad (1)$$

Находится напряженность поля E_{12} , которую создает передающая антенна 1 у приемной антенны 2. Затем вторая антенна становится передающей, а первая – приемной и находится напряженность поля E_{21} у первой антенны. Эти напряженности связаны с ЭДС генераторов ε_1 и ε_2 , которые включаются на входе антенн, соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{R \cdot E_{12}(Z_1 + Z_{A1})}{30kh_1 \cdot F_1(\Theta, \varphi)} \\ \varepsilon_2 &= \frac{R \cdot E_{21}(Z_2 + Z_{A2})}{30kh_2 \cdot F_2(\Theta, \varphi)} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где h – действующая длина антенны, $F(\Theta, \varphi)$ – ее диаграмма направленности, R – расстояние между антеннами, Z_1 и Z_2 – внутренние сопротивления генераторов. Подстановка (2) в (1) и группировка величин, относящихся к каждой антенне, приводит к заключению, что соотношение

$$\frac{I(Z + Z_A)}{E \cdot h \cdot F(\Theta, \varphi)} = N \quad (3)$$

является одинаковым для любой антенны. В соотношении (3) I – ток на зажимах приемной антенны; E – напряженность падающего поля в режиме приема; $Z_A, h F(\Theta, \varphi)$ – параметры антенны в режиме передачи; Z – сопротивление, включенное между зажимами антенны; величину N определяют для какой-либо простой антенны, например электрического диполя. Получают, что $N=1$. Тогда для тока в режиме приема записывают

$$\frac{E \cdot h \cdot F(\Theta, \varphi)}{Z + Z_A} \frac{\varepsilon_A}{Z + Z_A} = 1, \quad (4)$$

где

$$\varepsilon_A = E \cdot h \cdot F(\Theta, \varphi) - \quad (5)$$

– ЭДС, возбуждаемая в приемной антенне.

Из выражений (4) и (5) на основе принципа взаимности делают следующие выводы.

1. Внутреннее сопротивление приемной антенны равняется входному сопротивлению той же антенны в режиме передачи.

2. Диаграммы направленности антенны при приеме и передаче будут одинаковыми.

3. Действующая длина антенны при приеме и передаче будет одинаковой.

В отношении принципа взаимности, который используется для антенн, необходимо отметить следующее. Дифференциальная форма леммы Лоренца для двух независимых полей, создаваемых электрическими токами, имеет вид

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E}_1 \times \vec{H}_2 - \operatorname{div} \vec{E}_2 \times \vec{H}_1 = -\vec{E}_1 \cdot \vec{I}_2 + \vec{E}_2 \cdot \vec{I}_1 - \\ - \mu_0 \vec{H}_2 \frac{\partial \vec{H}_1}{\partial t} + \mu_0 \vec{H}_1 \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial t} - \varepsilon_0 \vec{E}_1 \frac{\partial \vec{E}_2}{\partial t} + \varepsilon_0 \vec{E}_2 \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial t}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (6) упрощается при переходе к монохроматическим полям и комплексным амплитудам, так как в правой части сокращаются четыре последних слагаемых и тогда имеет место

$$\operatorname{div} \dot{\vec{E}}_1 \times \dot{\vec{H}}_2 - \operatorname{div} \dot{\vec{E}}_2 \times \dot{\vec{H}}_1 = -\dot{\vec{E}}_1 \cdot \dot{\vec{I}}_2 + \dot{\vec{E}}_2 \cdot \dot{\vec{I}}_1. \quad (7)$$

Интегрирование (7) по объему, использование теоремы Остроградского-Гаусса и равенство нулю поверхностного интеграла при $V \rightarrow \infty$ дает лемму Лоренца в виде

$$\int_V (-\dot{\vec{E}}_1 \cdot \dot{\vec{I}}_2 + \dot{\vec{E}}_2 \cdot \dot{\vec{I}}_1) dV = 0. \quad (8)$$

Поскольку токи \vec{I}_1 и \vec{I}_2 отличны от нуля только в своих источниках V_1 и V_2 , то записывают

$$\int_{V_1} \dot{\vec{E}}_2 \cdot \dot{\vec{I}}_1 dV = \int_{V_2} \dot{\vec{E}}_1 \cdot \dot{\vec{I}}_2 dV. \quad (9)$$

Именно это соотношение называют теоремой взаимности для неограниченного пространства [3, 4] и синусоидальных полей. Заметим, однако, что в строгой постановке принцип взаимности в виде (1) из соотношения (9) доказан только для элементарных вибраторов [4].

Для более сложных излучателей использование соотношения (1) недопустимо, так как нет постоянства E_1 и E_2 у источников, нет равенства распределения токов на излучателях.

Сделаем ряд замечаний по физическому смыслу соотношений (6)–(8). Известно, что векторное произведение $\vec{E} \times \vec{H}$ в уравнении (6) характеризует мгновенную плотность потока мощности [3] и называется вектором Пойнтинга. Его размерность $(\text{В} \cdot \text{А}/\text{м}^2)$. Операция дивергенции div изменит размерность в левой части на $(\text{В} \cdot \text{А}/\text{м}^3)$. Произведение $\vec{E} \cdot \vec{I}$ является мгновенной мощностью, затрачиваемой источником. Его размерность $(\text{В} \cdot \text{А}/\text{м}^3)$. По аналогии с этим произведения $\vec{E}_1 \cdot \vec{I}_2$ и $\vec{E}_2 \cdot \vec{I}_1$ следует назвать взаимной мощностью источников. Остальные слагаемые также имеют размерности $(\text{В} \cdot \text{А}/\text{м}^3)$. Это позволяет сделать предположения, что это тоже какая-то мощность.

Исходя из этого соотношение (8) можно трактовать как разновидность закона сохранения энергии: «Сумма мощностей, передаваемых от первого источника ко второму и от второго к первому, равна нулю».

Из опыта по поочередному переключению одинаковых антенн с передачи на прием и наоборот можно сделать вывод, что произведение характеристик одинаковых антенн в режимах передачи и приема остается постоянным, а пространство между ними линейно. Вывод о равенстве распределения токов из этого опыта не следует. Соответственно, не следует и равенство приемно-передающих характеристик.

В работе [5] получены такие результаты, что даже для такой простой антенны как симметричный вибратор равенство распределения токов в режимах приема и передачи выполняется, только если его длина равна $\lambda/2$. Для других случаев они отличаются.

Из вышеизложенного следует вывод, что критерием равенства характеристик на прием и передачу может быть только равенство распределений токов в режимах передачи и приема, что в силу единственности решений уравнений Максвелла приводит к равенству характеристик на прием и передачу.

Перейдем теперь к теореме взаимности в случае несинусоидальных полей. Одной из первых работ по этому вопросу является работа [6], где приводится доказательство двух теорем для потенциалов и полей. Существенной особенностью работы является использование двух видов потенциалов векторного и скалярного и полей, запаздывающих для одного источника (излучателя) и опережающих для второго (приемника).

Доказанная теорема представлена в форме

$$\int_{T_1}^{T_2} \int_{V_2} \vec{E}_1 \cdot \vec{I}_2 dV dT = - \int_{T_1}^{T_2} \int_{V_1} \vec{E}_2 \cdot \vec{I}_1 dV dT. \quad (10)$$

За время T_1 выбирается время до включения источников, за T_2 – после выключения. Для времени T_1 отстающие поля везде будут равны нулю, а для времени T_2 – опережающие поля равны нулю.

Сравнение теорем взаимности в форме (8) и (10) показывает, что из теоремы в форме (10) еще труднее сделать заключение типа (1), так как к объемному интегралу прибавился интеграл по времени. Как следствие, это приводит к тому, что кроме пространственного распределения тока по излучателю необходимо учитывать и зависимость тока от времени. И для равенства характеристик излучателей в режимах приема и передачи необходимо равенство пространственно-временных распределений токов и тогда, в силу единственности решений уравнений Максвелла, будет одинаковое значение полей E_1 и E_2 в смысле пространственно-временной зависимости.

Учет временной зависимости токов и полей в соотношении (10) требует, чтобы поля и токи присутствовали на излучателях одновременно, так как иначе их произведение обращается в нуль. Это означает, что соотношение (10) не универсально по отношению к длительности импульса и расстоянию между излучателями.

Существует еще одна работа [9], где рассматривается лемма Лоренца во временной области. Идея доказательства состоит в том, что используется интегральная форма леммы Лоренца для синусоидальных полей, далее применяется преобразование Фурье и изменяется порядок интегрирования по частоте и пространственным координатам. Используется свойство преобразования Фурье для произведения векторных функций и тогда получают теорему взаимности в виде:

$$\int_{V_1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\vec{I}_1(t-\tau) \cdot \vec{E}_2(\tau)] d\tau dV = \int_{V_2}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\vec{E}_1(t-\tau) \cdot \vec{I}_2(\tau)] d\tau dV. \quad (11)$$

Это соотношение не требует одновременного присутствия на излучателе тока I и поля E , однако из него также нельзя сделать вывод о равенстве токов в режимах приема и передачи, а, следовательно, и о равенстве характеристик на прием и передачу.

Вывод

Из приведенных выше рассуждений следует, что характеристики излучателей на прием и передачу разные. В связи с этим можно предложить два подхода: 1) для определения характеристик антенн НСВ в режиме приема необходимо найти пространственно-временное распределение тока в режиме приема; 2) не проводить разделения характеристик излучателей в режимах приема и передачи, а использовать одну приемно-передающую характеристику в виде соотношения свертки.

Для реализации первого подхода возможно использование строгих методов теории дифракции. Однако, вычисления достаточно трудоемки. Реализация второго подхода проще при использовании пространственно-временной импульсной характеристики системы двух приемно-передающих антенн.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0143.

Литература

1. Драбкин, А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. – М.: Сов. радио, 1974. – 535 с.
2. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 431 с.
3. Марков, Г.Т. Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская. – М.: Сов. радио, 1974. – 373 с.
4. Федоров, Н.Н. Основы электродинамики / Н.Н. Федоров. – М.: Высшая школа, 1965. – 328 с.
5. Лашманова, Т.И. Анализ приемного вибратора на основе дифференциального уравнения / Т.И. Лашманова // Устройства и методы прикладной электродинамики: тез. докл. II Вс. НТК. – М.: МАИ, 1991. – С. 21.
6. Welch, W.J. Reciprocity Theorems for Electromagnetic Fields Whose Time Dependence is Arbitrary / W.J. Welch // IRE Trans. on Ant. and Prop. – AP-8. 1960. – № 1.
7. Пановский, В. Классическая электродинамика / В. Пановский, М. Филипс. – М.: ГИФМЛ, 1983. – 32 с.
8. Ландау, Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1967. – 487 с.
9. Семенихина, Д.В. Интегральные соотношения нестационарного рассеяния полей на нелинейных контактах / Д.В. Семенихина, Б.М. Петров // Рассеяние электромагнитных волн. – Таганрог: ТРТИ, 1989. – С. 29–34.

Крымский Валерий Вадимович, д-р техн. наук, профессор, кафедра электротехники и возобновляемых источников энергии, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), kvv@susu.ac.ru.

Вахитов Максим Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), vmg@kipr.susu.ac.ru.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”
2013, vol. 13, no. 2, pp. 104–108

ANTENNAS NON-SINUSOIDAL WAVES IN RECEIVE MODE

V.V. Krymsky, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
kvv@susu.ac.ru

M.G. Vakhitov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
vmg@kipr.susu.ac.ru

The antenna characteristics of non-sinusoidal waves (NSW) are described in receive mode. With the use of three types of reciprocity theorem for pulsed fields, it is shown that the spatial and temporal antennas characteristics in the transmit and receive modes are different because of different current distribution on the antenna to transmit and receive modes. Two approaches are proposed: it is necessary to find the spatial and temporal dis-

tribution of the current in the antenna in receive mode for the determination of antenna NCW, don't take the separation of antenna characteristics in receive and transmit modes, and use a two-way response characteristic in the form of mutual convolution relation.

Keywords: antenna, the reciprocity theorem, the electromagnetic wave.

References

1. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna-feeder devices]. Moscow, Sov.radio, 1974. 535 p.
2. Sazonov D.M. *Antenny i mikrovolnovye ustroystva SVCH* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Visshaya shkola, 1988. 431 p.
3. Markov G.T., Petrov B.M., Grudinskaya G.P. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and propagation]. Moscow, Sov.radio, 1974. 373 p.
4. Fedorov N.N. *Osnovy elektrodinamiki* [Foundations of electrodynamics]. Moscow, Visshaya shkola, 1965. 328 p.
5. Lashmanova T.I. Analysis of the receiver oscillator based on differential equations [Analiz priyemnogo vibratora na osnove differentsyalnogo uravneniya]. *V sbornike: Ustroystva i metody prikladnoy elektrodinamiki* [Devices and methods of applied electrodynamics] Tezisi dokladov II Vs NTK. Moscow, MAI. 1991, p. 21.
6. Welch W. J. Reciprocity Theorems for Electromagnetics Fields Whose Time Dependence is Arbitrary IRE Trans. On Ant and Prop. v. AP-8. 1960. № 1.
7. Panovskiy V., Filips M. *Klassicheskaya elektrodinamika* [Classical electrodynamics]. Moscow, GIFML, 1983, 32 p.
8. Landau L.D., Lifshich E.M. *Teoriya polya* [Field theory]. Moscow, Nauka, 1967. 487 p.
9. Semenikhina D.V., Petrov B.M. Integral relations nonstationary scattering fields on the nonlinear contact [Integralnye sootnosheniya nestatsionarnogo rasseyaniya polya na nelineynykh kontaktakh]. *Sbornik: Rasseyanie elektromagnitnykh voln.* [The scattering of electromagnetic waves]. Taganrog. TRTI, 1989, pp. 29–34.

Поступила в редакцию 3 марта 2013 г.