

---

УДК 621.396.677

А.В. Ченькаев<sup>1</sup>, Г.В. Ермаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Академия внутренних войск, Харьков

<sup>2</sup> Харьковский зональный отдел Военной службы правопорядка, Харьков

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ГРУППИРОВКЕ ВОЙСК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

*В статье предложен метод определения коэффициентов ослабления воздействия непреднамеренной помехи, который позволяет проанализировать влияние сверхширокополосных сигналов на узкополосные приемные системы в различных условиях.*

**Ключевые слова:** *непреднамеренная помеха, сверхширокополосный сигнал, коэффициент ослабления, электромагнитная совместимость.*

### Введение

**Анализ литературы.** Увеличение пропускной способности канала передачи информации при защите боевых порядков войск возможно за счет применения новых видов сигналов с большой абсолютной шириной спектра, например, сверхширокополосных (СШП). СШП средство функционального поражения (ФП) может быть использовано в качестве противодействия радиоуправляемым взрывным устройствам (РУВУ), применяемых при проведении террористических акций.

В силу неопределенности частоты работы передатчика РУВУ (100 – 2500 МГц) СШП заградительная или поражающая помеха должна иметь ширину спектра сигнала не меньше диапазона длин волн, используемых террористами [1]. Тогда в силу большой ширины спектра СШП сигнала и большой пиковой мощности (> 50 МВт) возникает проблема изучения электромагнитной обстановки для оценки помехоустойчивости радиолокационных систем (РЛС) и систем связи группировки при воздействии на них ультракороткого сигнала наносекундной длительности.

Наличие большого количества внеполосных излучений и побочных каналов приема в случае использования СШП сигналов может привести к непредсказуемым последствиям.

На сегодняшний день достаточно подробно изучены вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) узкополосных радиоэлектронных средств (РЭС) связи [2 – 4], определены побочные каналы приема непреднамеренных помех [5, 6], проанализированы их энергетические характеристики. В ряде стран приняты нормы на спектральную плотность излучаемой мощности СШП РЭС гражданского назначения [7].

Однако в известных авторам работах отсутствуют сведения о характеристиках ЭМС СШП РЭС большой импульсной мощности с существующими РЛС военного назначения, а также сведения, относящиеся к анализу непреднамеренных помех, создаваемых СШП средствами ФП.

**Целью данной статьи** является анализ коэффициентов ослабления воздействия непреднамеренной помехи, создаваемой СШП средством функционального поражения, для последующей оценки электромагнитной обстановки.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Расчет энергетических характеристик непреднамеренных помех, определяющих помеховую обстановку в любой точке пространства, предусматривает определение ее плотности потока мощности в точке расположения антенны.

При парной оценке ЭМС мощность непреднамеренной помехи определяется по формуле [8]:

$$P_{\text{ин}} = P_i G_i^{\text{пер}} G_i^{\text{пр}} \left( \frac{c}{4\pi f_{\text{ин}} r_0} \right)^2 \prod_{v=1}^{11} k_v, \quad (1)$$

где  $P_i$  – спектральная плотность мощности составляющей СШП сигнала;  $G_i^{\text{пер}}$  – коэффициент усиления (КУ) передающей антенны;  $G_i^{\text{пр}}$  – коэффициент усиления (КУ) приемной антенны;  $f_{\text{ин}}$  – частота непреднамеренной помехи, соответствующая побочному каналу приема;  $r_0=1$  м – базовое расстояние;  $k_v$  – коэффициент ослабления.

Коэффициенты ослабления характеризуют условия применения радиоэлектронных систем (РЭС), а также организационно-технические мероприятия, связанные с обеспечением ЭМС:

$k_1$  – ослабления воздействия помехи при побочном излучении;

$k_2$  – ослабления воздействия помехи за счет наличия естественных и искусственных препятствий на трассе распространения помехи;

$k_3$  – ослабления воздействия помехи за счет распространения вблизи земной поверхности;

$k_4$  – ослабления воздействия помехи за счет поглощения энергии в атмосфере;

$k_5$  – ослабления воздействия помехи за счет несовпадения ориентации главного лепестка ДН передающей антенны с направлением на приемное устройство;

$k_6$  – ослабления воздействия помехи за счет несовпадения ориентации главного лепестка приемной антенны с направлением на передающее устройство;

$k_7$  – ослабления воздействия помехи за счет несовпадения поляризации;

$k_8$  – ослабления воздействия помехи в антенно-фидерном тракте приемного устройства;

$k_9$  – ослабления воздействия помехи за счет временного разнеса;

$k_{10}$  – ослабления воздействия помехи за счет потерь при распространении радиоволн вдоль поверхности объекта;

$k_{11}$  – ослабления воздействия помехи за чет территориального разнеса.

Наличие в выражении (1) совокупности коэффициентов ослабления позволяет учесть влияние практически всех мер и мероприятий по обеспечению ЭМС РЭС, а также влияние большинства характеристик РЭС на обеспечение ЭМС.

Коэффициент  $k_1$  характеризуется отношением мощностей побочного  $P_{\text{пи}}$  и основного каналов  $P_{\text{осн}}$  радиоизлучений, измеренных в равных по ширине полосах частот на одинаковых удалениях [9]:

$$k_1 = \frac{P_{\text{пи}}}{P_{\text{осн}}}. \quad (2)$$

В случае использования СШП сигналов при переходе на  $n$ -ую гармонику сдвигается весь спектр сигнала. Если предположить, что частота, соответствующая "центру тяжести" спектра (аналог несущей частоты для узкополосного сигнала), составляет  $f_{\text{цт}}=1000$  МГц ( $n=1$ ), то при переходе на вторую гармонику ( $n=2$ )  $f_{\text{цт}}=2000$  МГц и т.д. Такой подход позволяет получить зависимость  $k_1(n)$ , представленную на рис. 1.

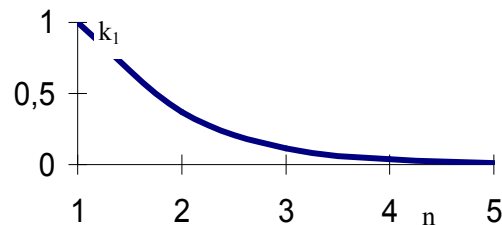


Рис. 1. Коэффициент ослабления воздействия помехи при побочном излучении в зависимости от номера гармоники  $f_{\text{цт}}$ .

Отметим, что подобная зависимость будет характерна и для других длительностей СШП сигнала с различной временной структурой.

Коэффициент ослабления воздействия помехи за счет наличия естественных и искусственных препятствий вычисляются, как правило, с учетом типа рельефа местности и углов затенения РЭС препятствиями. Степень влияния рельефа местности зависит от длины волны, высоты и расположения неровностей, высоты антенн. В случае использования СШП антенной системы подвижного средства ФП определить точные характеристики рельефа местности для расчетов ЭМС РЭС в широком частотном диапазоне не представляется возможным. Поэтому, без потери общности, положим, что

$$k_2=1. \quad (3)$$

Коэффициент ослабления воздействия помехи вблизи поверхности Земли зависит от длины волны спектральной составляющей СШП сигнала и безразмерного параметра, определяемого для случая СШП сигнала в виде:

$$d_r(\omega) = \frac{2\pi^2 c r_{ij}}{\omega} \cdot \frac{\sqrt{(\varepsilon'(\omega)-1)^2 + \left(\frac{120\pi c \sigma}{\omega}\right)^2}}{\varepsilon'(\omega)^2 - \left(\frac{120\pi c \sigma}{\omega}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние между СШП средством ФП и РЭС группировки;  $\epsilon'$  – относительная диэлектрическая проницаемость воды (действительная часть);  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость среды.

При исследовании процессов распространения радиоволн в задачах радиосвязи приходится учитывать их рассеяние от различных участков земных естественных (природных) и искусственных поверхностей. Наличие растительных покровов с различными электрофизическими свойствами приводит к различным рассеивающим свойствам подстилающей поверхности. При оценке рассеивающих свойств лесной поверхности общая тенденция такова, что с ростом удельной биомассы растительности на единице площади поверхности увеличивается модуль удельной диэлектрической проницаемости. В общем случае при решении задач рассеяния на диэлектриках необходимо знание его дисперсионных свойств в широком частотном диапазоне.

Лес сильно экранирует земную поверхность и ослабляет влияние почвы. При использовании СШП сигналов, частотный спектр которых составляет 100 МГц – 2,5 ГГц, рассеивающие элементы леса (листья, иглы, ветки) обычно меньше длины волны, поэтому лес того или иного вида можно охарактеризовать средней комплексной диэлектрической проницаемостью [10].

Для хвойного и лиственного леса комплексные диэлектрические проницаемости будут:

$$\epsilon_{\text{хв}} = 1 + \frac{1}{3} dW \epsilon_{\text{в}},$$

где  $d$  – плотность растительной массы леса;  $W$  – относительная влажность растительной массы;  $\epsilon_{\text{в}}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость воды, входящей в состав рассеивающих элементов леса с учетом проводимости растворенных в ней солей.

Для хвойного леса  $dW = 4 \times 10^{-3}$  [9].

Комплексная диэлектрическая проницаемость воды определяется дебаевской релаксационной формулой [10]:

$$\epsilon_{\text{в}} = \frac{80 + 1,8\omega^2\nu^2}{1 + \omega^2\nu^2} - j \frac{78,2\omega\nu}{1 + \omega^2\nu^2} - j60\lambda\sigma,$$

где  $\sigma$  – проводимость воды растительной массы с учетом растворимых в ней солей (для рассматриваемого диапазона  $\sigma = 1,5$  См/м);  $\nu = 10^{-10} - 10^{-15}$  с – релаксационный параметр.

В дальнейших расчетах положим, что  $\epsilon' = \frac{80 + 1,8\omega^2\nu^2}{1 + \omega^2\nu^2} \approx 80 \gg 1$  и  $\sigma = 1,5$  для всех спектральных составляющих СШП сигнала. Тогда параметр  $d_r$  для рассматриваемого диапазона будет изменяться в следующих пределах:  $0,6 \leq d_r \leq 6$ . Учитывая полученные выше результаты при условии, что дальность прямой видимости  $r_r = 4,12(\sqrt{h_j} + \sqrt{h_i}) = 11$  км

( $h_j = h_i = 2$  м), а также, что основная энергия передается коротковолновой частью спектра непреднамеренной помехи ( $\lambda_n < 1$  м), для расчета (рис. 2) используем следующее выражение [11]:

$$k_3(\omega) = \left| \sin \frac{h_j h_i \omega}{rc} \right|^2 \text{ для } r < r_r, h_{j(i)} \gg \lambda_n, \quad (5)$$

где  $h_j$  – высота подъема антенны СШП средства ФП;  $h_i$  – высота подъема антенны средства группировки, для которого оценивается ЭМС.

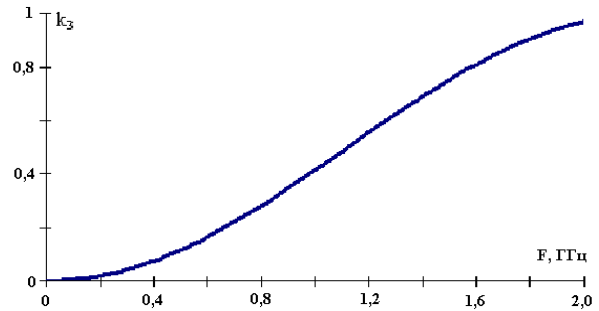


Рис. 2. Коэффициент ослабления вблизи поверхности Земли

Коэффициент  $k_4$  ослабления воздействия помехи за счет распространения в атмосфере зависит от частоты спектральной составляющей и расстояния между РЭС. Для большинства практически важных случаев для частот  $f < 10$  ГГц коэффициент

$$k_4 = 1. \quad (6)$$

Для побочных каналов приема при  $f \geq 10$  ГГц ослабление в атмосфере должно учитываться с соответствующей поправкой, определяемой наличием спектральных линий поглощения паров воды и кислорода. Необходимо отметить, что при  $f = 22,2$  ГГц в атмосфере наблюдается наличие линии поглощения у паров воды. При этом даже при небольших расстояниях  $k_4$  существенно уменьшается и составляет порядка 0,1.

В общем случае ориентация главного лепестка диаграммы направленности (ДН) СШП антенны не будет совпадать с главным лепестком антенны РЭС в группировке войск. В этом случае коэффициент ослабления  $k_6 = G_{\text{пер}}^{\text{бл}} / G_{\text{пр}}^{\text{бл}}$ , где  $G_{\text{пер}}^{\text{бл}}, G_{\text{пр}}^{\text{бл}}$  – коэффициента передающей и приемной антенн по боковым лепесткам. Результаты расчетов показывают, что для СШП зеркальной антенны боковой фон составляет –20 дБ/Вт.

Для приемной антенны полоса ее пропускания будет определяться типом излучателя: для вибраторов – 10%, для рупоров – 30% от несущей. По всей видимости, в данном случае, как и для СШП антенны, необходимо определять некоторый средний уровень. На рис. 3 представлена ДН антенны в виде параболического цилиндра размером 2 м x 0,5 м с

вибраторним облучателем (кривая 1 соответствует частоте 1000 МГц, 2 – 950 МГц, 3 – 1050 МГц, 4 – средняя ДН). Для нормированной средней ДН уровень первого бокового лепестка, соответствующий  $k_6$ , составляет –12 дБ.

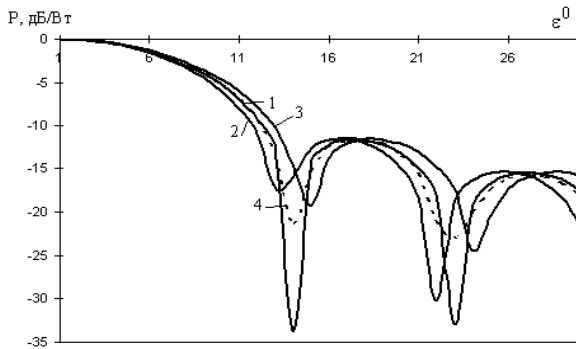


Рис. 3. ДН антенны в виде параболического цилиндра с вибраторным облучателем

На рис. 4 представлена ДН той же антенны с рупорным облучателем (кривая 1 соответствует частоте 1000 МГц, 2 – 1050 МГц, 3 – 1150 МГц, 4 – 850 МГц, 5 – 950 МГц, 6 – средняя ДН). Для нормированной средней ДН уровень первого бокового лепестка, соответствующий  $k_6$ , составляет –13 дБ/Вт.

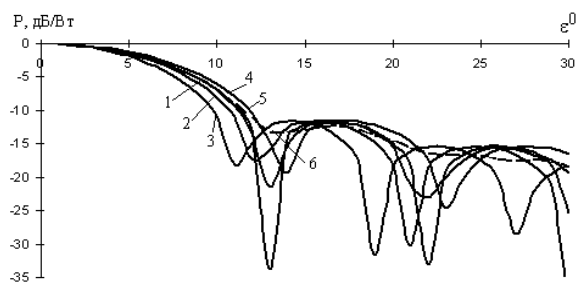


Рис. 4. ДН антенны в виде параболического цилиндра с рупорным облучателем

В рассматриваемой задаче с секторной СШП РТС выберем

$$k_5 = k_6 = -20 \text{ дБ/Вт},$$

что соответствует боковому фону зеркальной СШП антенны. Коэффициент  $k_7$  ослабления воздействия помехи за счет несовпадения поляризаций определяется соотношением:

$$k_7 = \begin{cases} k_{пл} \\ 1 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $k_{пл}$  – поправочный коэффициент и определяемый в случае совпадения главных лепестков диаграмм направленности приемной и передающей антенн.

Отметим, что поскольку понятие поляризации для СШП сигналов не определено, целесообразно задаться  $k_7 = 1$ . Коэффициент ослабления помехи в антенно-фидерном тракте  $k_8$  определяется соотношением [12]:

$$k_8(\omega) = 10^{-0,2 \frac{\omega_j}{\omega_{пр}} \beta_\phi G_{пр}^{b_0} L_p(\omega)}, \quad (8)$$

где  $\omega_j$  – циклическая частота непреднамеренной помехи;  $\beta_\phi = 0,1 = 1,5 \text{ дБ}$  – потери в фидере приемной антенны на рабочей частоте;  $b_0 = 0,3$  – для апертурных антенн с КУ  $G > 100$ ;

$$L_p(\omega) = \exp\left(-0,6 \frac{\Delta\omega}{\omega_j}\right) - 1$$

– безразмерный коэффициент, учитывающий частотную расстройку помехи и сигнала,

$\Delta\omega = |\omega_j - \omega_{пр}|$  – частотный разнос между рабочей частотой приемника и частотой непреднамеренной помехи.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента  $k_8$  от частоты непреднамеренной помехи представлена расчетная зависимость коэффициента  $k_8$  от частоты для полосы пропускания приемной антенны, определяемой типом облучателя непреднамеренной помехи без учета конструкции облучателя зеркальной антенны.

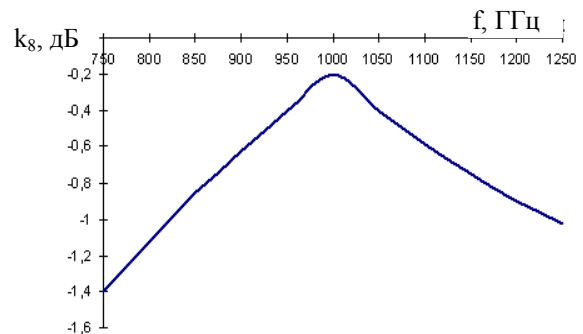


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления в антенно-фидерном тракте от частоты помехи

Так, для зеркальной антенны с облучателем вибраторного типа полоса пропускания составит 950 – 1050 МГц, для рупорного типа 850 – 1150 МГц, то  $k_8 = -0,3 \text{ дБ/Вт}$ .

Коэффициент  $k_9$  ослабления воздействия помехи за счет временного разноса имеет 2 крайних случая:

- совпадения времени излучения передающего устройства со временем работы приемного ( $k_9 = 1$ ),
- несовпадения времени излучения передающего устройства со временем работы приемного ( $k_9 = 0$ ).

Для определенности положим

$$k_9 = 1. \quad (9)$$

Коэффициент ослабления помехи за счет потерь при распространении радиоволн вдоль поверхности объекта  $k_{10}$  определяется на основе использования основного положения геометрической теории дифракции, связанного с принципами распространения электромагнитной энергии прямым и поверх-

ностным лучами. Поверхностный луч возникает в точке, где прямой луч касается поверхности, и его распространение происходит по геодезической линии. Коэффициент  $k_{10}$  определяют по эмпирической формуле [13]

$$k_{10} = 10^{-\frac{A_{\text{зат}}}{\eta_0 A_{\text{зат}} + \xi_0}}, \quad (10)$$

где  $A_{\text{зат}}$  – коэффициент затенения, зависящий от формы объекта, на котором размещаются антенны;

$\eta_0, \xi_0$  – числовые коэффициенты, определяемые эмпирическим путем в зависимости от принятой аппроксимации формы объекта.

Если затенение между антеннами отсутствует или антенны расположены на разных объектах, то полагают, что  $A_{\text{зат}}=0$  [12]. В этом случае

$$k_{10} = 1. \quad (11)$$

Коэффициент ослабления помехи  $k_{11}$  за счет территориального разнорасположения в свободном пространстве определяется как

$$k_{11} = \left( r_0 / r_{ij} \right)^2. \quad (12)$$

## Выводы

Таким образом, соотношения (1) – (12) позволяют провести оценку помеховой обстановки при известных КУ передающей и приемной антенн, спектральной плотности гармонических составляющих СШП сигнала (непреднамеренных помех), создаваемых СШП средством ФП.

## Список литературы

1. Хабаров В.Б. Еще раз о перспективах развития радиоуправляемых взрывных устройств и способов борьбы с ними / В.Б. Хабаров // *Специальная техника*. – 2004. – № 1. – С. 16-24.
2. Князев А.Д. Проблемы обеспечения совместной работы радиоэлектронной аппаратуры / А.Д. Князев, В.Ф. Пчелкин. – М.: Сов. радио, 1971. – 200 с.

3. Воронин А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости на этапе эксплуатации / А.А. Воронин // *Технология и средства связи*. – 1998. – № 5. – С. 70-74.

4. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В.И. Владимиров, А.Л. Докторов, Ф.В. Елизаров и др.; под ред. Н.М. Царькова. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.

5. Иванов В.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В.А. Иванов, Л.Я. Ильницкий, М.И. Фузик. – К.: Техніка, 1983. – 118 с.

6. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А.Д. Князев. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.

7. Иммореев И.Я. Электромагнитная совместимость сверхширокополосных и узкополосных систем связи / И.Я. Иммореев, А.А. Судаков // *Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: сб. докладов Всероссийской науч. конф. Муром, 1 – 3 июля 2003 г.* – Муром: Изд. – полиграфический центр МИ ВлГУ, 2003. – С. 481-486.

8. Минин Б.А. СВЧ и безопасность человека / Б.А. Минин. – М.: Сов. радио, 1974. – 352 с.

9. Михайлов А.С. Измерение параметров ЭМС РЭС / А.С. Михайлов. – М.: Связь, 1980. – 200 с.

10. Бахвалов Б.Н. Распространение электромагнитных волн. Влияние местности и окружающей среды на распространение радиоволн и характеристики РЛС / Б.Н. Бахвалов. – Х.: ВИРТА им. Говорова, 1988.

11. Защита от радиопомех / под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. радио, 1976. – 496 с.

12. Справочник по радиоэлектронным системам: В 2 т. Т. 2. И.А. Болошин, В.В. Быков, В.В. Васин и др. / под ред. Б.Х. Кривичко. – М.: Энергия, 1979. – 375 с.

13. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Ю.А. Феоктистов, В.В. Матасов, Л.И. Башурин, В.И. Селезнев; под ред. Ю.А. Феоктистова. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.

Поступила в редколлегию 14.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ В УГРУПОВАННІ ВІЙСЬК ПРИ ВИКОРИСТАННІ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

О.В. Ченикаев, Г.В. Єрмаков

Запропонований метод визначення коефіцієнтів ослаблення впливу непередбаченої завади на радіоелектронні системи військового угруповання. Метод дозволяє проаналізувати вплив надширокопосмугових сигналів на вузькопосмугові приймальні системи радіоелектронних засобів в різних умовах.

**Ключові слова:** непередбачена завада, надширокопосмуговий сигнал, коефіцієнт послаблення, електромагнітна сумісність.

## ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC SITUATION IN CROUCHING TROOPS AT THE USE OF ULTRAWIDEBAND SIGNALS

A.V. Chenykayev, G.V. Yermakov

In the article method of determination of weakening coefficients of influence of unpremeditated handicaps on radioelectronic systems of crouching troops is offered. Method allows to analyse influence of ultrawideband signals on the narrow-band receiving systems under various conditions.

**Keywords:** unpremeditated handicaps, ultrawideband signal, coefficient of weakening, electromagnetic compatibility.