

УДК 621.396.967.15

В.Д. Карлов¹, Е.В. Лукашук², Н.Н. Петрушенко³¹ Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків² ПАО «АО Научно-исследовательский институт радиотехнических измерений», Харків³ Главная инспекция Министерства обороны Украины, Киев

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

В статье рассматриваются возможности обнаружения поляризованного сигнала на фоне частично поляризованной помехи, воздействующей по главному лепестку диаграммы направленности приемной антенной системы наземного комплекса управления космическими аппаратами с управляемой поляризацией и оценивается эффективность подавления помехи за счет использования пространственной и поляризационной селекции. Проведен анализ возможности использования антенных решеток, как для исключения влияния различного рода помех, так и для компенсации воздействия переотраженных сигналов.

Ключевые слова: помеха, отраженный сигнал, диаграмма направленности, антенный подавитель.

Введение

Постановка проблемы: Типовая антенная система (АС) наземного комплекса управления космическими аппаратами (НКУКА), как известно [1], обеспечивает всенаправленный прием сигналов преимущественно в верхней полусфере. Это позволяет принимать сигналы одновременно от нескольких спутников, находящихся в разных точках небесной сферы. Однако всенаправленный прием является причиной того, что наряду с полезными сигналами на вход приемного устройства антенной системы поступают также разного рода мешающие сигналы, обычно называемые помехами [2].

Помехи, которые ухудшают точность работы НКУКА, а иногда делают невозможным их использование, бывают различными как по происхождению, так и по типу. Основные источники помех описаны в [1, 2]. Поэтому возникает задача повышения помехозащищенности НКУКА. Однако в известной литературе данному вопросу, в настоящее время уделено мало внимания. Восполнению этого пробела и посвящена данная статья. **Цель статьи:** проанализировать способы повышения помехозащищенности антенной системы наземного комплекса управления космическими аппаратами.

Основная часть

Как известно [3, 4], повышение помехоустойчивости АС осуществляется по нескольким основным направлениям. Так в [4] предложено для этих целей использовать компенсаторы помех. Как следует из [1, 4], использование таких компенсаторов позволяет получить выигрыш при подавлении помехи по мощности порядка 30 дБ [1].

Известно также, что кроме преднамеренных и естественных помех, попадающих в полосу пропускания

приемника АС, значительное влияние на точность определения текущего местоположения и параметров движения спутника оказывают сигналы, переотраженные от различных поверхностей, в том числе и от морской поверхности. Пример формирования такого переотраженного сигнала показан на рис. 1.



Рис. 1. Принцип формирования переотраженного сигнала

В [1, 4] отмечено, что подобные сигналы имеют вид, близкий к полезным сигналам спутника. Прием таких переотраженных сигналов существенно ухудшает точность определения параметров полезных сигналов, потому что они искажают как их амплитуду, так и задержку доплеровский сдвиг частоты. Поэтому для улучшения помехозащищенности АС разработаны способы и устройства, в частности антенные подавители [4].

Как следует из [4], в основу создания антенного подавителя положена возможность формирования диаграммы направленности (ДН) сложной формы, которую принципиально можно реализовать с помощью многоэлементной антенной решеткой. В такой АР для подавления помех происходит таким образом, чтобы её максимум совпадал с направлением на полезный сигнал, а минимум – в направлении на помеху.

При воздействии помехи по главному лепестку ДН антенн осуществление пространственной селек-

ции путем формирования провалов (нулей) в ДН в направлении на постановщик помех приводит, как известно [5] к существенным искажениям главного лепестка и увеличению уровня боковых лепестков. Однако, как следует из [5] ослабление искажений ДН можно достичь, используя для борьбы с помехами в главном лепестке поляризационных полезных и помеховых сигналов.

Известно, что частично поляризованные радиосигналы являются наиболее общим случаем поляризационного состояния помех. Степень поляризации помех оказывает значительное влияние на эффективность поляризационной селекции. В этой связи представляет интерес рассмотрение задачи обнаружения полностью поляризованного сигнала на фоне частичнополяризованной помехи, воздействующей по главному лепестку ДН приемной АР с управляемой поляризацией и определения возможности подавления помехи путем пространственной и поляризационной селекции. Синтез амплитудно-фазового распределения приемных АР с управляемой поляризацией проведем по критерию максимума логарифма отношения правдоподобия. Пусть на АР с управляемой поляризацией состоящей, например из крестообразных излучателей с токами вдоль координатных осей ОУ и ОZ поступает полностью поляризованный (известный) сигнал \vec{U}_0 и частично поляризованные помехи ием $\vec{U}_i (i \in [1, M])$.

Задача оптимизации состоит в нахождении такого оптимального вектора амплитудно-фазового распределения, который обеспечивает максимум выбранного критерия χ .

Используя методику решения аналогичной задачи, приведенной в [6], окончательно отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности шума и помех на выходе АР с управляемой поляризацией в случае частично поляризованных помех можно представить в виде:

$$\chi = \frac{|e_0^H V|^2}{V^H \left\{ P + \sum_{i=1}^M \left[e(\vec{U}_i) e^H(\vec{U}_i) + e_i(\vec{U}_i) \times \right. \right. \left. \left. \times e^H(\vec{U}_i) \right] \cdot q_i^{c\Lambda} + \sum_{i=1}^N q_i^{per} e_i e \right\} V} = q_0 \frac{V^H W V}{V^H M V}, \quad (1)$$

где параметры: s, s_i – плотность потока мощности, падающих с направлений \vec{U}_0, \vec{U}_i ; λ – длина волны; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град. – постоянная Больцмана; Δf – полоса пропускания приемника; \tilde{q}_i – интенсивность хаотически поляризованной составляющей мощности i -той частично поляризованной помехи на выходе АР, \vec{U}_i – направления; $\tilde{\xi}_0, \tilde{\xi}_i$ – вектор поля-

ризации поля падающей волны полезного сигнала и регулярной составляющей i -й помехи на входе решетки; $V = \begin{Bmatrix} Y \\ Z \end{Bmatrix}$ – $2N+1$ вектор амплитудно-фазового распределения АР; W, P, M – неотрицательно и положительно определенные эрмитовы матрицы размера $2N$ соответственно; e_0, e_i – $2N$ мерные векторы-столбцы ($i \in [1, M]$), элементы которых определяют степень поляризационного согласования (расогласования) поля каждого излучателя решетки с полем падающей волны полезного сигнала (с направления \vec{U}_0) и составляющей i – помехи (с направления \vec{U}_i), имеющей регулярную составляющую; $q_0 = s \lambda^2 / (|\tilde{\xi}_0|^2 k \cdot \Delta f)$ – величина мощности полезного сигнала; $q^{per} = s_i \lambda^2 / (|\tilde{\xi}_0|^2 k \cdot \Delta f)$ – величина мощности регулярной составляющей помехи; $q^{c\Lambda} = \tilde{q}_i / (k \cdot \Delta f)$ – величина мощности неполяризованной (случайной) составляющей помехи на входе решетки к тепловому шуму. В этом случае тепловой шум обусловлен равномерным фоном с яркостной температурой $T_j(\vec{U}) = 1$ на её входе.

Представление матрицы W в (1), как произведение векторов $W = e_0 \cdot e_0^H$, позволяет получить решение задачи в явном виде [7]:

$$V = M^{-1} \cdot e_0. \quad (2)$$

При этом максимум χ_M равен

$$\chi_M = q_0 e_0^H V. \quad (3)$$

Как видно из (3), оптимальное амплитудно-фазовое распределение зависит от соотношения интенсивностей хаотически и регулярно поляризационных составляющих помех, т.е. от степени поляризации частично поляризованных помех

$$m_i = \frac{q_i^{per}}{q_i^{per} + q_i^{c\Lambda}}, \quad i \in [1, M] \quad (0 \leq m_i \leq 1).$$

Как видно из (3), χ_M зависит как от q_0 , так и от m_i . При $m_i=1$ ($q_i^{c\Lambda}=0, i \in [1, M]$) выражение 1 совпадает с отношением сигнал/шум + помеха для полностью поляризованных помех.

Рассмотрим численные примеры синтеза линейной АР+излучателей с управляемой поляризацией поля. Пусть $N_{изл.}=4; d/\lambda=0,5$; пусть наряду с полезным сигналом ($\vec{U}_0 - \theta_0 = 90^\circ; \phi_0 = \theta^\circ$) круговой поляризации ($q_0 = 100$) на исследуемую решётку воздействуют интенсивная внешняя частично поляризованная помеха ($M = 1$) с направления $\theta_1=75^\circ; \phi_1=0^\circ$, примерно составляющего полуширину ДН по уровню половинной мощности (табл. 1).

Таблица 1

Оптимумы амплитудно-фазового распределения

m	Vn	n			
		1	2	3	4
1	Y n	1,0e j 4,97	0,637ej5,2	0,637ej6,1	1,0ej6,25
	Zn	0,85e j 0,216	0,196ej0,73	0,196ej1,06	0,854ej1,58
0,9	Y n	1,0e j 4,96	0,632ej5,1	0,632ej5,1	1,0ej6,26
	Zn	0,849e j 0,22	0,203ej0,74	0,202ej1,05	0,849ej1,56
0,5	Y n	1,0e j 4,92	0,612ej5,06	0,612ej6,13	1,0ej6,27
	Zn	0,83e j 0,24	0,226ej0,75	0,222ej1,0	0,83ej1,51
0,1	Y n	1,0e j 4,89	0,6ej5,02	0,6ej6,14	1,0ej6,27
	Zn	0,818e j 0,25	0,24ej0,754	0,235ej0,985	0,82ej1,48
0,01	Yn	1,0e j 4,87	0,606ej5,02	0,606ej6,13	1,0ej6,28
	Zn	0,815e j 0,23	0,25ej0,8	0,246ej0,925	0,816ej1,49

Как видно из численных значений оптимума амплитудно-фазового распределения (табл. 1) в зависимости от степени поляризации помехи m_1 изменяются направленные и поляризованные характеристики оптимума AP с управляемой поляризацией, происходит перераспределение роли пространственного и поляризационного подавления помехи.

Так, при $m_1 \rightarrow 1$ (что соответствует помехе с ярко выраженной регулярной составляющей поляризации), подавление её происходит в основном за счёт поляризационных свойств решётки – в направлении помехи поляризация поля антенны перпендикулярна регулярной составляющей поляризации помехи $K_{d2}(\theta_1) \approx 0$.

При уменьшении m_1 (т.е. при увеличении интенсивности хаотически поляризованной составляющей помехи) степень поляризационного подавления регулярно поляризованной составляющей помехи ухудшается – $K_{d2}(\theta_1)$ увеличивается.

При этом в направлении помехи в ДН формируется более глубокий энергетический провал, что в свою очередь приводит к большему смещению главного максимума ДН и к снижению коэффициента направленного действия (КНД). При этом AP с управляемой поляризацией обеспечивает практически такое же отношение сигнал/помехи + шум, (помеха – частично поляризованная) на выходе, как и в случае полностью поляризованной помехи ($m_1 = 1$) большой интенсивности ($q_{1reg} = 100$).

Рассмотрим случай, когда по главному лепестку ДН решётки в направлении $\theta_2 = 100^\circ \dots$ (~ 0.75 полуширины ДН по уровню половинной мощности) воздействует вторая помеха полностью поляризованная ($m_2 = 1$) вертикальной поляризации с интенсивностью $q_{reg} = 100$. Анализ зависимости КНД оптимума от угла θ и оптимальная поляризационная характеристика, соответствующая степени поляризации первой помехи, равной $m_1 = 0.01$, показывает, что оптимальная решётка обеспечивает полное подавление полностью поляризованной помехи с направления $\theta_2 = 100^\circ$

Как следует из [4], в случае НКУКА предпочтительным является второй вариант, потому что источ-

ники полезных сигналов системы, то есть искусственные спутники Земли и подвижные носители приемников, являются в общем случае динамическими объектами. Поэтому AP, которая формирует максимум в направлении полезного сигнала, получается достаточно сложной и требующей точной настройки. При втором варианте AC формирует всенаправленную диаграмму в случае отсутствия мешающих воздействий или переотраженных сигналов. При появлении источника мешающих воздействий или переотраженного сигнала в направлении на источник помехи формируется провал ДН. Этот способ является более предпочтительным, потому что количество источников мешающих воздействий, как правило, не велико. Согласно теории адаптивных антенных систем, количество антенных элементов должно быть на единицу больше чем количество помехоносителей [6].

В соответствии с [7] работы по созданию адаптивных AC проводит компания NAVSYS (США), специалисты которой создали шестнадцатиеlementную AP, предназначенную как для исключения влияния различного рода помех, так и для компенсации воздействия переотраженных сигналов. Как показано в [8] использование AC с формированием адаптивной ДН позволяет снизить уровень помехи на величину порядка 40 дБ. Отмечено, что фирмой NAVSYS разрабатывается миниатюрная антенна, предназначенная для широкого круга подвижных пользователей (самолеты и беспилотные объекты) [9].

Фирмой Raytheon Systems Limited (Великобритания) создана система GAS-1, предназначенная для повышения помехоустойчивости приемоиндикаторов подвижных объектов [9, 10]. Конструктивно система состоит из двух блоков: многоэлементной управляемой антенной решетки и электронного блока управления. Решетка состоит из семи элементов, что дает возможность формирования нулей ДН в направлении на шесть источников помех. Система предназначена для обнаружения помех, определения направления прихода мешающих воздействий и адаптивного формирования нулей ДН в этих на-

правлениях. Кроме семиэлементной системы GAS-1 в интересах Военно-морских сил США проходит испытания AP GAS-1N. Разработка системы GAS-1N была вызвана тем, что система GAS-1 слишком велика для установки её на небольшие объекты. Отличие системы GAS-1N состоит в том, что количество элементов AP уменьшено до четырех. По заявлениям экспертов такой решетки вполне достаточно для решения задач обеспечения помехоустойчивости.

Применение пространственного селективного признака в адаптивных AP различного назначения рассмотрено в работе [6]. Кроме этого в работе [10] приведены результаты полунатурного эксперимента моделирования 7-элементной AP, формирующей нули в ДН в направлении на помеху и реализующая подавления помехи более чем на 30 дБ. В [11] приведены результаты создания управляемой AP для объектов с ограниченными габаритами, из которых следует, что управление нулями ДН позволяет значительно повысить пороговое отношение R_{Π}/R_C , где R_{Π} – мощность помехового сигнала, R_C – мощность полезного сигнала до уровня 84 дБ для современных приемников и до 98 дБ – для перспективных. Рассматриваемая AP имела габариты 15 см при работе на частоте 1572,42 МГц. Полосу частот она обеспечила $\Delta f = 20$ МГц, тип элемента – микрополосковые квадратные пластины, расстояние между элементами – $0,5\lambda$. Исследования выявили возможность подавления помех с эффективностью до 50 дБ.

Выводы

Таким образом, в зависимости от степени поляризации помех происходит перераспределение роли поляризационного и пространственного подавления. С уменьшением мощности частично поляризованной помехи подавление осуществляется путем поляризационной селекции, при этом искажение формы ДН уменьшает или увеличивает КНД в направлении на спутник излучающий полезный сигнал.

При воздействии частично поляризованной помехи в направлении полуширины ДН θ_A оптимальная антенная решетка с управляемой поляризацией поля обеспечивает практически такое же отношение сигнал/шум+помеха на выходе, как и в случае полностью поляризованной помехи большой интенсивности. Так при степени поляризации $m=0,01$ мощность сигнал/шум+помеха уменьшается на 5% по сравнению с полностью поляризованной помехой.

Список литературы

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. – М: Эко-Трендз, 2000. – 224 с.
2. Авиационные применения спутниковых приемников в условиях помех / Задорожный А.И., Соловьев Ю.А., Маркелов М.А., Гордиенко Д.Н. // 3-я между. конф. «Глобальная радионавигация», г. Москва, 9-11 октября 2000 г.
3. Прокофьев В.П. Синтез адаптивной системы компенсации помех с параллельно-последовательной обработкой входных сигналов / В.П. Прокофьев, А.И. Неволько, Ю.П. Чиняев // Проблемы управления и информатики [Автоматика]. – 1997. – № 6. – С. 66-69.
4. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич. – М.: Радио и связь, 1986. – 324 с.
6. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. – М.: Наука, 1965.
7. Brown A., Multipath Rejection Through Spatial Processing, NAVSYS Corporation, www.navsys.com.
8. A. Brown, R, Silva, A GPS Digital Phased Array Antenna and Receiver, NAVSYS Corporation, www.navsys.com.
9. C.W. Manny et al, Advanced Mini Array Antenna Design Using High Fidelity Computer Modeling and Simulation. ION GPS - 2000, Salt Lake City, 2000.
10. Рекламный проспект системы GAS-1 фирмы Raytheon Systems Limited www.raytheon.com.
11. Brown A., et al. Miniaturized GPS Antenna Array Technology, ION 55-Annual Meeting Proc., 1999.

Поступила в редколлегию 15.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕШКОДОЗАХИСТУ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСУ КЕРУВАННЯ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

В.Д. Карлов, О.В. Лукашук, М.М. Петрушенко

У статті розглядаються можливості виявлення поляризованого сигналу на фоні частково-поляризованої перешкоди, що впливає по головному пелюстку діаграми спрямованості приймальної антенної системи наземного комплексу управління космічними апаратами з керованою поляризацією і оцінюється ефективність зменшення перешкоди за рахунок використання просторової і поляризаційної селекції. Проведений аналіз можливості використання антенних ґрат, як для виключення впливу різного роду перешкод, так і для компенсації дії переотражених сигналів.

Ключові слова: перешкода, відбитий сигнал, діаграма спрямованості, антенний пригнічувач.

TO QUESTION OF INCREASE OF PHINDRANCE DEFENCE OF OF AERIAL SYSTEM OF SURFACE COMPLEX SPACE VEHICLES CONROL

V.D. Karlov, H.V. Lukashuk, N.N. Petrushenko

In the article possibilities of finding out the polarized signal are examined on a background the partial-polarized hindrance, influencing on the main petal of diagram of orientation of the receiving antenna system of surface complex of management space vehicles with the guided polarization and efficiency of suppression of hindrance is estimated due to the use of spatial and polarization selection. The analysis of possibility of the use of arrays is conducted, both for the exception of influence of different sort of hindrances and for indemnification of influence of pereotrazhennykh signals.

Keywords: hindrance, reflected signal, diagram of orientation, aerial cancellator.