

УДК 621.371.3

Энергетическая скрытность низкоорбитальной низкочастотной системы спутниковой связи при произвольном удалении приемника радиоперехвата

Пашинцев В. П., Чипига А. Ф., Анзин И. В.

Постановка задачи: известен способ повышения энергетической скрытности систем спутниковой связи (ССС) при близком размещении приемника радиоперехвата за счет понижения несущей частоты и применения пространственно-разнесенного приема сигналов. Однако он противоречит традиционному способу повышения энергетической скрытности СССР при удаленном размещении приемника радиоперехвата за счет сужения диаграммы направленности передающей антенны ИСЗ. Поэтому необходимо исследовать возможность обеспечения энергетической скрытности низкочастотных СССР при произвольном размещении приемника радиоперехвата за счет применения низкоорбитальных ИСЗ и сужения диаграммы направленности передающей антенны для уменьшения зоны обслуживания до границ России. **Целью работы** является разработка методики оценки энергетической скрытности низкоорбитальной низкочастотной СССР при выборе ширины диаграммы направленности передающей антенны ИСЗ по уровню нулевого излучения в пределах границ России и произвольном удалении приемника радиоперехвата. **Новизна:** заключается в теоретическом обобщении двух методов повышения энергетической скрытности СССР: за счет применения пониженной несущей частоты и пространственно-разнесенного приема сигналов и за счет повышения пространственной скрытности путем снижения высоты орбиты ИСЗ, а также сужения диаграммы направленности передающей антенны. **Результат:** разработана трехэтапная методика получения аналитической зависимости энергетической скрытности СССР от удаления приемника радиоперехвата в виде произведения коэффициента пространственной скрытности (обусловленной диаграммой направленности передающей антенны ИСЗ и высотой орбиты) и выигрыша от применения пространственно-разнесенного приема и понижения частоты. **Практическая значимость:** полученная зависимость указывает на возможность обеспечения очень высокого коэффициента энергетической скрытности низкочастотной СССР (более 28 дБ) при произвольном удалении приемника радиоперехвата. Причем при близком его размещении высокая энергетическая скрытности низкочастотной СССР обеспечивается за счет пространственно-разнесенного приема замирающих сигналов, а на удалении более 740 км – за счет пространственной скрытности излучения передающей антенны ИСЗ с высотой орбиты 700 км.

Ключевые слова: спутниковая связь, энергетическая скрытность, пониженная частота, диаграмма направленности антенны, пространственно-разнесенный прием сигналов.

Библиографическая ссылка на статью:

Пашинцев В. П., Чипига А. Ф., Анзин И. В. Энергетическая скрытность низкоорбитальной низкочастотной системы спутниковой связи при произвольном удалении приемника радиоперехвата // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 122-135. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/07-Pashintsev.pdf>

Reference for citation:

Pashintsev V. P., Chipiga A. F., Anzin I. V. Stealth Energy of the Low-Orbit Low-Frequency Satellite Communication System in Any Removing the Radio Transmission Receiver. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 122-135. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/07-Pashintsev.pdf> (in Russian).

Введение

Известно [1], что одним из основных направлений повышения энергетической скрытности систем спутниковой связи (ССС), является применение передающих антенн с узкой диаграммой направленности (ДН). Однако при близком размещении приемника радиоразведки относительно приемника ССС, когда они оба находятся в пределах ширины ДН передающей антенны ИСЗ (зоны обслуживания), этот способ повышения энергетической скрытности становится неэффективным.

С другой стороны, известен [2-4] способ повышения энергетической скрытности ССС от радиоперехвата (РПХ) сигналов за счет одновременного понижения несущей частоты (до $f_0=30\dots100$ МГц) передаваемого с ИСЗ сигнала и применения на земной станции разнесенного приема на несколько ($n=2\dots4$) антенн. Этот способ позволяет обеспечить очень высокую энергетическую скрытность ССС (22...34 дБ) при близком ($R_p \leq 10$ км) размещении приемника РПХ от приемника ССС. Условием его применимости является использование в приемнике РПХ одиночной антенны ($n_p=1$) и невозможность применения в нем разнесенного приема на несколько ($n_p=2\dots4$) антенн (в силу ограничений на массогабаритные характеристики аппаратуры радиоразведки).

Для сужения зоны обслуживания возможно использование низкоорбитального ИСЗ, однако в диапазоне частот $f_0=30\dots100$ МГц сложно реализовать узкую ДН передающей антенны ИСЗ (например, спиральной). Поэтому при широкой ДН бортового передатчика низкочастотной ССС зона обслуживания может быть настолько обширной, что приемник РПХ можно разместить за границей России, где он (как и приемник ССС) сможет использовать несколько ($n_p=2\dots4$) антенн. Представляется очевидным, что в этом случае обеспечить высокую энергетическую скрытность низкочастотной ССС возможно за счет выбора параметров передающей антенны ИСЗ так, чтобы ее ширина ДН по уровню нулевого излучения не выходила за пределы государственной границы РФ. Предлагаемый способ обеспечения энергетической скрытности низкоорбитальной низкочастотной ССС при произвольном удалении приемника радиоперехвата за счет выбора ширины ДН передающей антенны ИСЗ по уровню нулевого излучения ($2\theta_0$) в пределах государственной границы Российской Федерации (РФ) приведен на рис. 1.

Целью статьи является разработка методики оценки энергетической скрытности низкоорбитальной низкочастотной системы спутниковой связи при выборе ширины диаграммы направленности передающей антенны ИСЗ по уровню нулевого излучения в пределах границ России и произвольном удалении приемника радиоперехвата.

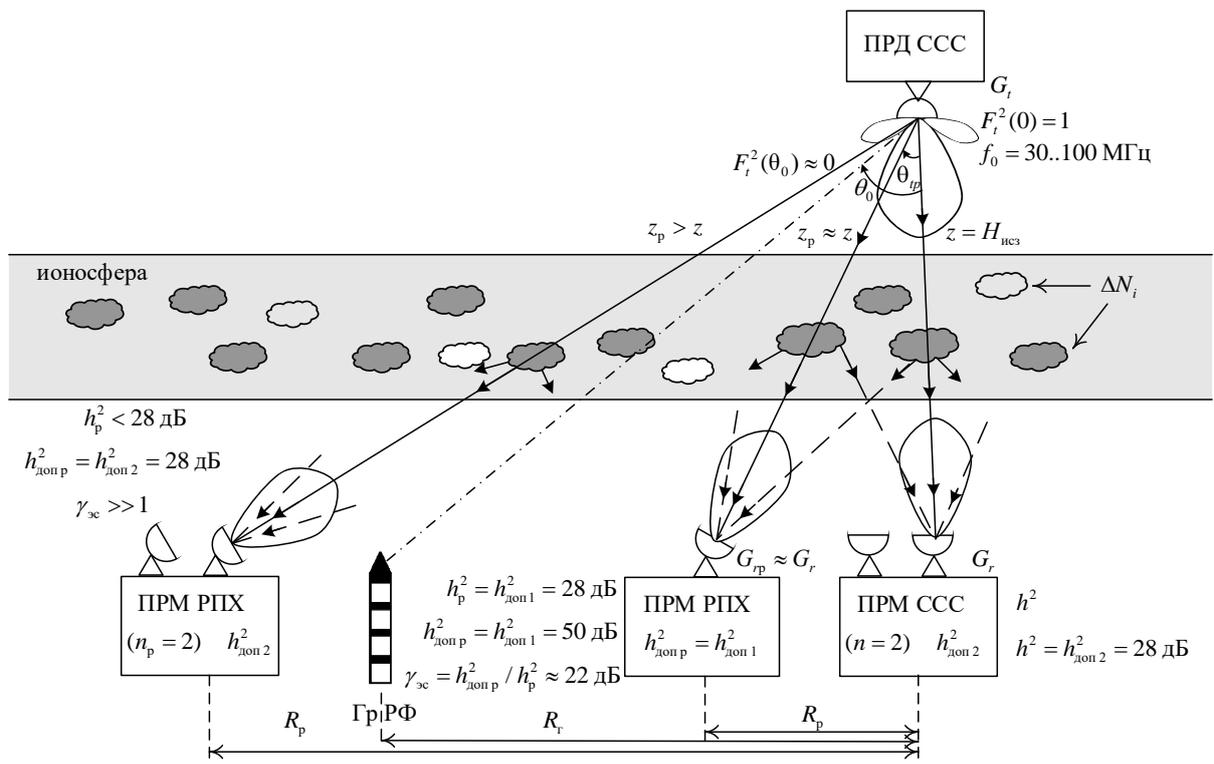


Рис. 1. Способ обеспечения энергетической скрытности низкочастотной ССС при размещении приемника радиоперехвата в пределах государственной границы России ($R_p \leq R_r$) и за ней ($R_p > R_r$)

Методика оценки энергетической скрытности

Проанализируем возможности известного [2-4] способа повышения энергетической скрытности ССС за счет понижения несущей частоты сигнала бортового передатчика (ПРД) ССС (до $f_0=30\dots100$ МГц) и применения разнесенного приема на две ($n=2$) антенны (рис. 1) для двух случаев:

- 1) применения в приемнике (ПРМ) РПХ одной ($n_p=1$) антенны при удалении его на расстояние R_p в пределах государственной границы (Гр) РФ ($R_p \leq R_r$);
- 2) удаления приемника РПХ, использующего две ($n_p=2$) антенны, на расстояние R_p , превышающее расстояние до границы РФ ($R_p > R_r$). При этом ширина ДН передающей антенны ИСЗ по уровню нулевого излучения ($2\theta_0$) не выходит за пределы государственной границы РФ.

Условием обеспечения энергетической скрытности ССС является не превышение фактического отношения сигнал/шум на входе приемника РПХ h_p^2 над допустимым значением $h_{доп\ p}^2$. Это условие ($h_p^2 < h_{доп\ p}^2$) можно записать в виде превышения коэффициента энергетической скрытности над единицей: $\gamma_{эс} = h_{доп\ p}^2 / h_p^2 > 1$.

Согласно [2, 3] условие обеспечения энергетической скрытности ССС можно записать в развернутом виде как

$$\gamma_{эс} = \frac{h_{доп\ p}^2}{h_p^2} = \frac{1}{F_t^2(\theta_{t\ p})} \frac{G_r}{G_{r\ p}} \frac{z_p^2}{z^2} \frac{L_{т\ p}}{L_{т\ п}} \frac{T_{э\ p}}{T_{э}} \frac{h_{доп\ p}^2}{h_{доп\ p}^2 \Gamma} > 1, \quad (1)$$

где $F_t^2(\theta_{t\ p}) = G_t(\theta_{t\ p})/G_t \leq 1$ – нормированная ДН передающей антенны ИСЗ по мощности в направлении $\theta_{t\ p}$ на приемник разведки (РПХ); G_r и $G_{r\ p}$ – коэффициенты усиления антенн приемников ССС и РПХ; z_p и z – дальности радиолиний от ИСЗ до приемников РПХ и ССС; $L_{т\ p}$ и $L_{т\ п}$ – потери передачи из-за поглощения волны в среде радиолиний разведки (радиоперехвата) и связи; $T_{э\ p}$ и $T_{э}$ – эквивалентные шумовые температуры приемных систем радиоперехвата и земной станции.

В дальнейшем будем считать, что в приемнике РПХ обеспечиваются примерно такая же шумовая температура и коэффициент усиления, как и в приемнике ССС (т.е. $T_{э\ p}/T_{э} \approx 1$ и $G_r/G_{r\ p} \approx 1$). Можно показать [2], что потери передачи из-за поглощения волны в среде (ионосфере) радиолиний разведки и связи малы и примерно одинаковы ($L_{т\ p}/L_{т\ п} \approx 1$). Тогда условие (1) обеспечения энергетической скрытности ССС сводится к приближенному виду

$$\gamma_{эс} = \frac{h_{доп\ p}^2}{h_p^2} \approx \frac{1}{F_t^2(\theta_{t\ p})} \frac{z_p^2}{z^2} \frac{h_{доп\ p}^2}{h_{доп\ p}^2 \Gamma} > 1. \quad (2)$$

Согласно рис. 1 при близком размещении приемника РПХ относительно приемника ССС (например, $R_p \leq 10$ км) и при любой высоте орбиты ИСЗ $H_{ИСЗ} = z = 700 \dots 40000$ км угол наблюдения приемника РПХ с ИСЗ будет очень мал: $\theta_{t\ p} < 0,01^\circ$. Поэтому значение $F_t^2(\theta_{t\ p}) \approx 1$, протяженность радиолинии разведки практически не отличается от протяженности радиолинии ССС ($z_p/z \approx 1$). Тогда условие обеспечения энергетической скрытности ССС (2) при близком размещении приемника РПХ сводится к простому виду $\gamma_{эс} = h_{доп\ p}^2/h_p^2 \approx h_{доп\ p}^2/h_{доп\ p}^2 \Gamma > 1$.

Известный [3-8] способ обеспечения энергетической скрытности ССС при близком размещении приемника РПХ базируется (рис. 1) на понижении несущей частоты передаваемого с ИСЗ сигнала до $f_0 = 30 \dots 100$ МГц (при которой распространение радиоволн сопровождается рассеянием на неоднородностях ионосферы ΔN_i , появлением относительных фазовых сдвигов проходящих лучей $\Delta \varphi_i = \Delta N_i/f_0$ и замираний принимаемых сигналов, близких к релеевским) и применении разнесенного приема на несколько (например, $n=2$) антенн. В этом случае фактическое отношение сигнал/шум на входе приемника РПХ (h_p^2) будет практически равно (при $\Gamma=1$) допустимому отношению сигнал/шум на входе приемника ССС, которое при $P_{ош\ доп} = 10^{-5}$ и применении $n=2$ разнесенных антенн может составлять $h_{доп\ 2}^2 \approx 28$ дБ. Допустимое отношение сигнал/шум на входе приемника РПХ при одиночном ($n_p=1$) приеме сигналов с релеевскими замираниями составляет $h_{доп\ p}^2 = h_{доп\ 1}^2 = 50$ дБ. В этом случае в ССС достигается очень высокий коэффициент энергетической скрытности, обусловленный выигрышем в

отношении сигнал/шум при использовании сдвоенного приема по сравнению с одиночным [4, 5, 8]:

$$\gamma_{эс} = h_{доп p}^2 / h_p^2 \approx h_{доп 1}^2 / h_{доп 2}^2 = 50 - 28 = 22 \text{ дБ.}$$

Анализ рис. 1 показывает, что по мере увеличения расстояния (R_p) между приемником РПХ и приемником ССС увеличивается угол ($\theta_p \sim R_p$) между направлениями видимости с ИСЗ приемников РПХ и ССС. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению нормированной ДН передающей антенны ССС в направлении на приемник разведки $F_t^2(\theta_p) < 1$ и увеличению дальности разведки $z_p(\theta_p)$. Поэтому по мере увеличения расстояния разведки ($R_p \sim \theta_p$) повышается коэффициент энергетической скрытности (2), который можно записать в виде функции от R_p как

$$\gamma_{эс}(R_p) \approx \frac{1}{F_t^2(R_p)} \frac{z_p^2(R_p)}{z^2} \frac{h_{доп pn}^2(R_p)}{h_{доп 2}^2 \Gamma} = \Pi(R_p) \Delta h_{доп n}^2(R_p) / \Gamma > 1. \quad (3)$$

Здесь

$$\Pi(R_p) = \frac{1}{F_t^2(R_p)} \frac{z_p^2(R_p)}{z^2} \geq 1 \quad (4)$$

– коэффициент пространственной скрытности ССС (постепенно возрастающий по мере удаления R_p приемника РПХ от приемника ССС);

$$\Delta h_{доп n}^2(R_p) = h_{доп pn}^2(R_p) / h_{доп 2}^2 \begin{cases} \gg 1, & \text{если } n_p = 1 \text{ при } R_p \leq R_r; \\ \leq 1, & \text{если } n_p \geq 2 \text{ при } R_p > R_r. \end{cases} \quad (5a)$$

– выигрыш в энергетической скрытности от применения пространственно-разнесенного приема замирающих сигналов в низкочастотной ССС, т.е. составляющая коэффициента энергетической скрытности ССС, обусловленная понижением частоты и применением разнесенного приема на $n=2$ антенны.

Согласно рис. 1 при размещении приемника РПХ в пределах границы РФ ($R_p \leq R_r$) и вынужденном применении одиночной ($n_p = 1$) антенны величина выигрыша $\Delta h_{доп n}^2(R_p) = h_{доп 1}^2(R_p) / h_{доп 2}^2 \approx 22$ дБ. При размещении приемника РПХ за границей РФ ($R_p > R_r$) и возможности применения двух ($n_p = 2$) разнесенных антенн этот выигрыш отсутствует: $\Delta h_{доп n}^2(R_p) = h_{доп 2}^2(R_p) / h_{доп 2}^2 = 1$ (т.е. 0 дБ). Поэтому для рассматриваемого (рис. 1) случая выражение (5а) принимает вид

$$\Delta h_{доп n}^2(R_p) = h_{доп pn}^2(R_p) / h_{доп 2}^2 = \begin{cases} 22 \text{ дБ,} & \text{если } n_p = 1 \text{ при } R_p \leq R_r; \\ 0 \text{ дБ,} & \text{если } n_p = 2 \text{ при } R_p > R_r. \end{cases} \quad (5б)$$

Анализ рис. 1 и соотношений (3-5) показывает, что возможность выполнения условия обеспечения энергетической скрытности ССС $\gamma_{эс}(R_p) = \Pi(R_p) \Delta h_{доп n}^2(R_p) / \Gamma > 1$ при размещении приемника РПХ за границей РФ ($R_p \geq R_r$) определяется повышением пространственной скрытности $\Pi(R_p) \gg 1$, а при близком размещении к приемника ПРМ ССС ($R_p \ll R_r$) – повышением второй составляющей $\Delta h_{доп n}^2(R_p) = h_{доп 1}^2(R_p) / h_{доп 2}^2 \gg 1$, обусловленной понижением ча-

стоты ССС и применением разнесенного приема на две ($n = 2$) антенны при использовании в приемнике РПХ одной ($n_p = 1$) антенны.

Согласно (4) для определения коэффициента пространственной скрытности ССС $\Pi(R_p \sim \theta_{tp})$ необходимо установить зависимости от расстояния разведки R_p нормированной дальности разведки $z_p(R_p)/z = z_p(R_p)/H_{ИСЗ}$ и нормированной ДН антенны ИСЗ $F_t^2(\theta_{tp} \sim R_p)$.

Для определения дальности разведки $z_p(R_p \sim \theta_{tp})$ рассмотрим простейший случай (см. рис. 1), когда точка прицеливания передающей антенны ИСЗ совпадает с подспутниковой точкой ($z = H_{ИСЗ}$), где размещен приемник ССС, а приемник РПХ размещен на удалении R_p .

Расстояние разведки R_p соответствует половине угла $0,5\alpha_{об} = \alpha_p$ обзора этого расстояния из центра Земли с радиусом $R_3 \approx 6370$ км:

$$\alpha_p^\circ = R_p / (2\pi R_3 / 360^\circ) \approx R_p [\text{км}] / 111,2 \approx 9 \cdot 10^{-3} R_p [\text{км}]. \quad (6)$$

Чтобы связать α_p с углом на направление разведки θ_{tp} , следует учесть известную [9] зависимость угла обзора зоны обслуживания с ИСЗ ($\beta_{об}$) участка земной поверхности $2R_p$ от углового размера этой зоны из центра Земли ($\alpha_{об}$):

$$\beta_{об}^\circ = 180^\circ - \frac{\alpha_{об}}{2} - 2 \arctg \left[\frac{H_{ИСЗ}}{(2R_3 + H_{ИСЗ}) \operatorname{tg}(\alpha_{об}/4)} \right].$$

Тогда с учетом соотношений $\theta_{tp} = 0,5\beta_{об}$ и $\alpha_p = 0,5\alpha_{об}$, получим

$$\theta_{tp} = 90^\circ - \frac{R_p [\text{км}]}{222,4} - \arctg \left[\frac{H_{ИСЗ}}{(2R_3 + H_{ИСЗ}) \operatorname{tg}(R_p [\text{км}]/222,4)} \right]. \quad (7)$$

Зависимость указанных углов α_p и θ_{tp} от удаления приемника РПХ (R_p) определяют максимальную дальность разведки, т.е. расстояние между ИСЗ и точкой размещения приемника разведки (радиоперехвата)

$$z_p(R_p) = R_3 \sin \alpha_p / \sin \theta_{tp}. \quad (8)$$

Анализ выражений (6-8) и рис. 1, показывает, что по мере увеличения расстояния R_p между приемниками РПХ и ССС увеличивается угол на направление приемника разведки $\theta_{tp}(R_p)$ и дальность разведки $z_p(\theta_{tp})$. Кроме того, с понижением высоты орбиты ИСЗ ($H_{ИСЗ}$) возрастает угол на направление приемника разведки $\theta_{tp}(R_p, H_{ИСЗ})$ и дальность разведки $z_p(\theta_{tp}, H_{ИСЗ})$.

Чтобы определить вторую составляющую пространственной скрытности ССС (9) $\Pi(R_p) \sim 1/F_t^2(R_p)$, воспользуемся выражением (7), устанавливающим связь $\theta_{tp} = \psi(R_p, H_{ИСЗ})$, и общим выражением для нормированной ДН по напряжению цилиндрической спиральной антенны из n_c витков [10]

$$F_t(\theta_{tp}) \approx \frac{2}{\pi n} J_0(ka \sin \theta_{tp}) \cos \theta_{tp} \frac{\sin \pi n \xi}{\xi^2 - 1}. \quad (9)$$

Здесь $J_0(x)$ – функция Бесселя; $k = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число; α – радиус спирали;

$\xi = 1 + ka(1 - \cos \theta_p) \operatorname{tg} \alpha$ – коэффициент замедления волны; α – угол подъема витка спирали. При традиционных значениях $\alpha \approx 12 \dots 14^\circ$, когда $ka \approx 1$ выражение (9) сводится к более простому виду

$$F_t(\theta_{t,p}) \approx \frac{2}{\pi n_c} J_0(\sin \theta_p) \cos \theta_p \frac{\sin \pi n_c \xi}{\xi^2 - 1}, \quad (10)$$

где

$$\xi = 1 + 0.22(1 - \cos \theta_p) \operatorname{tg} \alpha. \quad (11)$$

Согласно [10] при $ka \approx 1$ и $\xi \approx 1$ значение $\sin \pi n_c \xi / (\xi^2 - 1) = \pi n_c / 2$. Поэтому при $\theta_{t,p} = 0$ будем иметь $J_0(\sin \theta_p) = J_0(0) = 1$ и $F_t(\theta_{t,p} = 0) = 1$.

На рис. 2 приведены нормированные ДН спиральной антенны по напряжению $F_t(\theta_{t,p})$ и по мощности $F_t^2(\theta_{t,p})$, построенные согласно (10, 11) при $n_c = 13$ и $\lambda_0 = 5$ м ($f_0 = 60$ МГц).

Анализ рис. 2 показывает, что ширина ДН данной спиральной антенны по половинной мощности составляет $2\theta_{0,5} \approx 54^\circ$, а по уровню нулевого излучения $2\theta_0 \approx 2 \cdot 49^\circ = 98^\circ$.

Искомая зависимость $F_t^2(R_p)$ нормированной ДН спиральной антенны от удаления приемника РПХ определяется выражениями (10) для $F_t(\theta_{t,p})$ и (7) $\theta_{t,p} = \psi(R_p, H_{ИСЗ})$.

Общее выражение (4) для расчета коэффициента пространственной скрытности ССС можно записать в децибелах как сумму 2-х слагаемых:

$$\Pi(R_p)_{\text{дБ}} = F_t^2(R_p)_{\text{дБ}} + [z_p(R_p)/H_{ИСЗ}]_{\text{дБ}}^2. \quad (12)$$

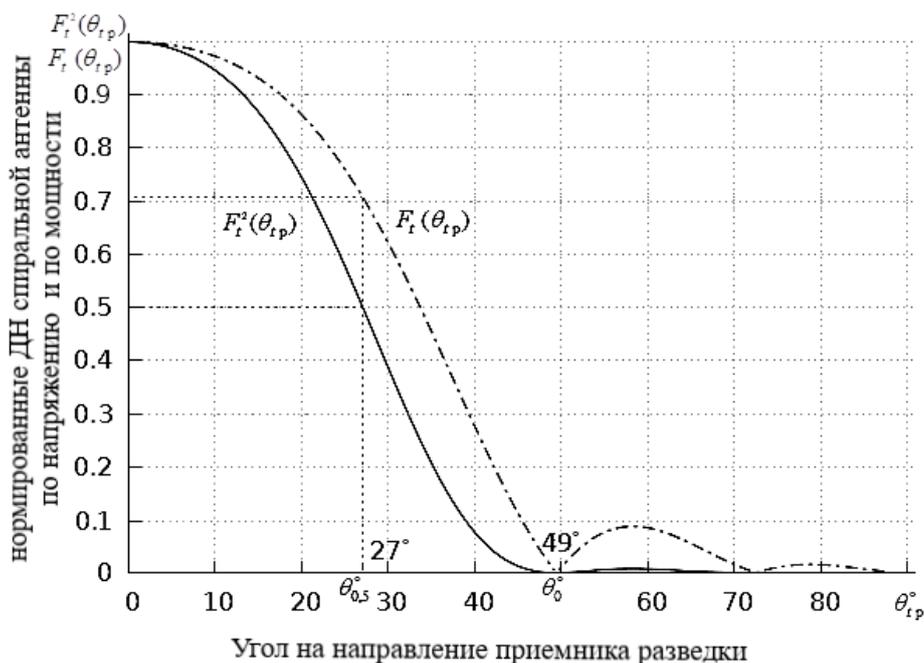


Рис. 2. Нормированные диаграммы направленности спиральной антенны

На рис. 3 приведена зависимость от удаления приемника РПХ (R_p) коэффициента пространственной скрытности ССС (12) $\Pi(R_p)$ и его составляющих $F_t^{-2}(R_p)$ и $\left[\frac{z_p(R_p)}{H_{ИСЗ}} \right]^2$ при низкой высоте орбиты ИСЗ $H_{ИСЗ} = 700$ км.

Анализ рис. 3 показывает, что график $F_t^{-2}(R_p)_{дБ}$ (штрихпунктирная линия) принимает максимальное значение ($\Pi_{дБ} \rightarrow \infty$), когда угол ($\theta_p \sim R_p$) между направлением на приемник разведки и приемник ССС будет равен половине ширины ДН по уровню нулевого излучения передающей антенны ИСЗ ($\theta_p = \theta_0 \approx 49^\circ$) и $F_t^2(\theta_p = \theta_0) = 0$. Этому углу нулевого излучения соответствует расстояние разведки, равное расстоянию до границы ($\theta_0 \sim R_p = R_r$), которое при высоте ИСЗ $H_{ИСЗ} = 700$ км составляет $R_r = 894$ км. Вклад второго слагаемого намного меньше и при $R_r = 894$ км составляет всего $\left[\frac{z_p(R_p)}{H_{ИСЗ}} \right]_{дБ}^2 \approx 6$ дБ. При удалении приемника РПХ на расстояние, превышающее границу $R_p > R_r$, пространственная скрытность ССС будет высокой: $\Pi_{дБ} > 28$ дБ.

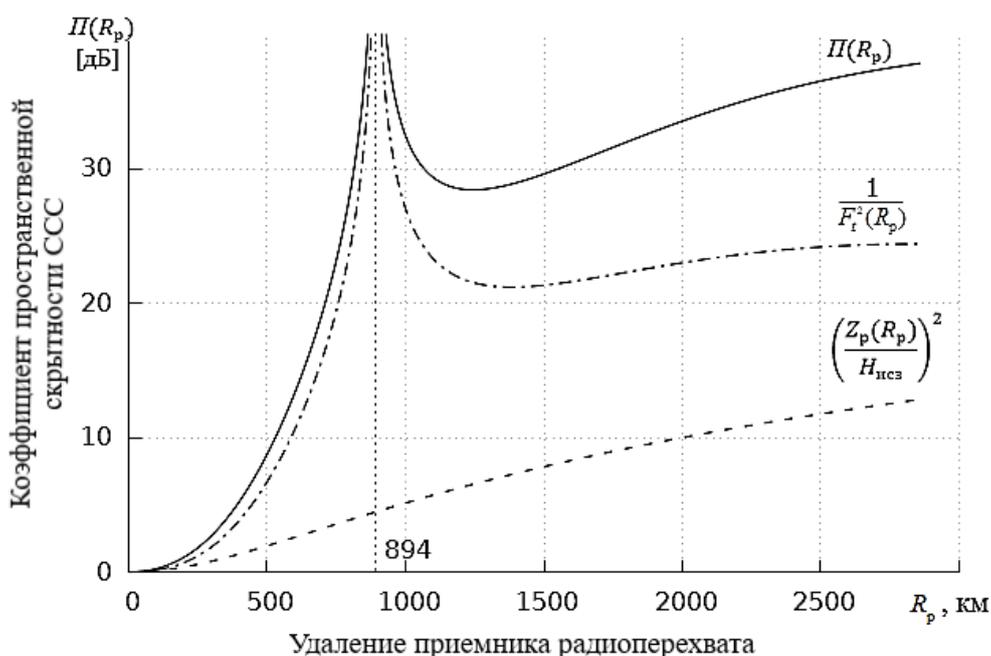


Рис. 3. Зависимость коэффициента пространственной скрытности ССС от удаления приемника радиоперехвата

Общее выражение (3) для расчета коэффициента энергетической скрытности ССС можно записать в децибелах в виде 3-х слагаемых

$$\gamma_{эс}(R_p)_{дБ} = \Pi(R_p)_{дБ} + \Delta h_{доп n}^2(R_p)_{дБ} - \Gamma_{дБ}. \quad (13)$$

Согласно выражению (5б) при использовании в приемнике РПХ одной антенны ($n_p = 1$), а приемнике ССС сдвоенного ($n = 2$) приема достигается выигрыш $\Delta h_{доп n}^2(\theta_p) = 22$ дБ, который можно считать неизменным при удалении приемника РПХ до границы ($R_p \leq R_r$). Поэтому график зависимости $\Delta h_{доп n}^2(R_p)$ при

$R_p \leq R_r$ будет иметь вид прямоугольника со сторонами $\Delta h_{доп n}^2 = 22$ дБ и $R_r = 894$ км (соответствующей высоте ИСЗ $H_{ИСЗ} = 700$ км).

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента энергетической скрытности низкочастотной ССС от удаления приемника РПХ $\gamma_{эс}(R_p)_{дБ}$ при высоте ИСЗ $H_{ИСЗ} = 700$ км и отсутствии энергетического запаса радиолинии ($\Gamma_{дБ} = 0$ дБ) и ее составляющие: $\Pi(R_p)$ и $\Delta h_{доп n}^2(R_p)$. Зависимость $\Pi(R_p)$ соответствует приведенной на рис. 3, а $\Delta h_{доп n}^2(R_p)$ построена согласно (5б).

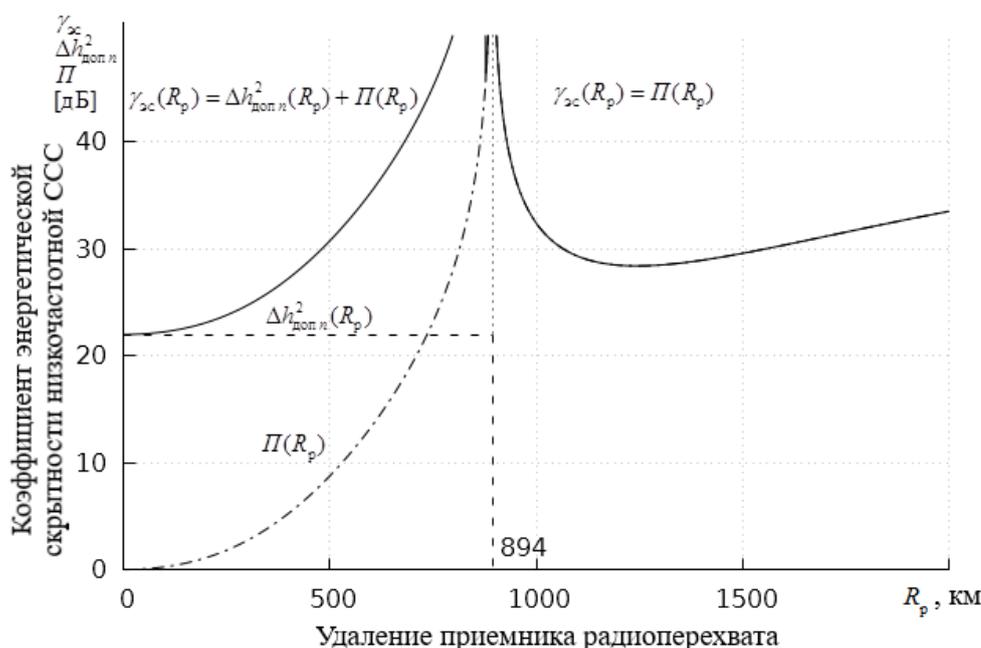


Рис. 4. Зависимость коэффициента энергетической скрытности низкочастотной ССС от удаления приемника радиоперехвата

Анализ рис. 4 и 1 показывает, что при размещении приемника РПХ, использующего одну ($n_p = 1$) антенну, близко ($R_p < 10$ км) от приемника ССС, использующего пониженные частоты и две ($n = 2$) антенны, энергетическая скрытность ССС определяется выигрышем от применения пространственно-разнесенного приема замирающих сигналов в низкочастотной ССС и составляет $\gamma_{эс}(R_p)_{дБ} \approx \Delta h_{доп n}^2(R_p)_{дБ} \approx 22$ дБ. При удалении приемника РПХ на расстояние $R_p \approx 430$ км энергетическая скрытность ССС возрастает до $\gamma_{эс}(R_p)_{дБ} = \Delta h_{доп n}^2(R_p)_{дБ} + \Pi(R_p)_{дБ} \approx 28$ дБ за счет повышения на $\Pi(R_p)_{дБ} \approx 6$ дБ коэффициента пространственной скрытности. При удалении приемника РПХ на расстояние границы $R_p = R_r = 894$ км энергетическая скрытность низкочастотной ССС будет определяться коэффициентом пространственной скрытности, величина которого $\gamma_{эс}(R_p)_{дБ} \approx \Pi(R_p)_{дБ} \rightarrow \infty$ обусловлена направлением нулевого излучения передающей антенны ИСЗ, соответствующим (см. рис. 2) $\theta_0 \approx 49^\circ$.

Это значение θ_0 и известное выражение для ширины ДН спиральной антенны по уровню нулевого излучения [10]

$$\Delta\theta_0 = 2\theta_0 \approx 162\sqrt{\lambda_0/L_c} = 162\sqrt{\lambda_0/Sn_c} \quad (14)$$

позволяет при заданной пониженной частоте ССС ($f_0 = c/\lambda_0$) определить длину L_c и шаг $S = L_c/n_c$ спирали. Так, при $\lambda_0 = 5$ м потребуется спиральная антенна длиной $L_c = 13,7$ м с шагом $S = L_c/n_c \approx 1,05$ м и длиной витка $l_c = S/\sin\alpha \approx \lambda_0 = 5$ м. Такая антенна обеспечивает коэффициент направленного действия $D \approx 15(L_c/\lambda_c) \approx 41$ (т.е. 16 дБ).

При размещении приемника РПХ за пределами государственной границы РФ ($R_p > R_r = 894$ км) и использовании им двух антенн ($n_p = 2$) выигрыш от применения в приемнике ССС разнесенного приема на две ($n = 2$) антенны не обеспечивается ($\Delta h_{\text{доп } n}^2(R_p)_{\text{дБ}} = 0$ дБ) и энергетическая скрытность ССС полностью (при $G=0$) определяется коэффициентом пространственной скрытности $\gamma_{\text{эс}}(R_p)_{\text{дБ}} = \Pi(R_p)_{\text{дБ}}$. Наименьшее его значение $\Pi(R_p) \approx 28$ дБ обеспечивается при удалении приемника РПХ на расстояние $R_p \approx 1250$ км, соответствующее направлению максимума излучения первого бокового лепестка ДН передающей антенны ИСЗ (см. рис. 1).

Заметим, что согласно рис. 4 коэффициент энергетической скрытности низкочастотной ССС превышает значение $\gamma_{\text{эс}}(R_p)_{\text{дБ}} > 28$ дБ при удалении приемника РПХ на расстояние $R_p > 430$ км при использовании в нем как одной ($n_p = 1$), так и двух ($n_p = 2$) антенн. Однако этот эффект достигается на удалении $R_p = 430 \dots 740$ км, главным образом, за счет выигрыша от пространственного разнесения на две антенны $\gamma_{\text{эс}}(R_p)_{\text{дБ}} \approx \Delta h_{\text{доп } n}^2(R_p)_{\text{дБ}} > 28$ дБ, а на удалении $R_p > 740$ км – за счет обеспечения пространственной скрытности бортовой антенной ИСЗ $\gamma_{\text{эс}}(R_p)_{\text{дБ}} \approx \Pi(R_p)_{\text{дБ}} > 28$ дБ.

Выводы

Разработана методика оценки предложенного способа обеспечения энергетической скрытности низкочастотной ССС при выборе ширины диаграммы направленности передающей антенны ИСЗ по уровню нулевого излучения в пределах государственной границы РФ и произвольном удалении приемника радиоперехвата (рис. 1). Она базируется на представлении энергетической скрытности низкочастотной ССС в виде (3-5) произведения коэффициента пространственной скрытности (обусловленной ДН передающей антенны ИСЗ) и выигрыша от применения пространственно-разнесенного приема и понижения частоты.

Методика состоит из трех основных этапов:

- 1) определения зависимости $\Pi(R_p)$ коэффициента пространственной скрытности ССС от удаления приемника РПХ согласно выражениям (6-8) и (10-12);

- 2) определения выигрыша $\Delta h_{\text{доп } n}^2$ от применения пространственно-разнесенного приема и понижения частоты согласно выражениям (5);
- 3) определения зависимости $\gamma_{\text{эс}}(R_p)$ коэффициента энергетической скрытности низкочастотной ССС от удаления приемника РПХ согласно выражению (13).

Полученная (рис. 4) зависимость $\gamma_{\text{эс}}(R_p)$ указывает на возможность обеспечения очень высокого коэффициента энергетической скрытности низкочастотной ССС ($\gamma_{\text{эс}}(R_p) > 28$ дБ) при произвольном удалении приемника радиоперехвата. Причем при близком его размещении высокая энергетическая скрытность низкочастотной ССС обеспечивается за счет пространственно-разнесенного приема замирающих сигналов, а на удалении $R_p > 740$ км – за счет пространственной скрытности излучения передающей антенны ИСЗ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках выполнения проекта № 18-07-01020.

Литература

1. Тузов Г. И., Сивов В. А., Прытков В. И., Урядников Ю. Ф., Дергачев Ю. А., Сулиманов А.А. Помехозащищенность систем со сложными сигналами. – М.: Сов. радио, 1985. – 264 с.
2. Чипига А. Ф., Сенокосова А. В. Защита информации в системах космической связи за счет изменения условий распространения радиоволн // Космические исследования. 2007. Т. 45. № 1. С. 59-66.
3. Чипига А. Ф., Сенокосова А. В. Способ обеспечения энергетической скрытности спутниковой связи // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 5. С. 428-433.
4. Пашинцев В. П., Цимбал В. А., Чипига А. Ф. Аналитическая зависимость энергетической скрытности спутниковой связи от выбора несущей частоты // Труды 18 Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 17-19 апреля 2012 г.). – Воронеж, 2012. – С. 2113-2120.
5. Pashintsev V. P., Chipiga A. F., Tsymbal V. A, Shimanov S. N. Procedure for calculating the dependence of the energy concealment factor on carrier frequency selection for low-frequency satellite communications system // Automatic control and computer sciences. 2016. Vol. 50. № 6. P. 408-414.
6. Pashintsev V. P., Katkov K. A, Katkov E. K., Gakhova N. N., Gakhov R. P., Titov A. I. Forecast accuracy of determining pseudo range in satellite navigation system through analysis of data from ionosphere monitoring // Journal Fundamental and Applied Sciences. 2017. № 9 (1S). P. 899-913.
7. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Smirnov V. M., Smirnova E. V., Tynyankin S. I. Procedure for Extraction of Small-Scale Variations in the Total Electron Content of the Ionosphere with the Use of Transionospheric Sounding Data // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. Vol. 62. № 12. P. 1336–1342.

8. Chipiga A. F., Pashintsev V. P., Tsymbal V. A., Zelenevskiy V. V. Low-Frequency Satellite Communication System Technical Means' Parameters Synthesis by the Requirements for Energetic Concealment and Noise Immunity // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2018. Vol. 52. № 3. P. 243–249.

9. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи. – М.: Альпина Паблишер, 2004. – 256 с.

10. Юрцев О. А., Рунов А. В., Казарин А. Н. Спиральные антенны. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.

References

1. Tuzov G. I., Sivov V. A., Prytkov V. I., Uryadnikov U. F., Dergachev U. A., Sulimanov A. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem so slozhnymi signalami* [Immunity of systems with complex signals]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1985. 264 p. (in Russian).

2. Chipiga A. F., Senokosova A. V. Information protection in space communication systems using changes in radio wave propagation conditions. *Cosmic Research*, 2007, vol. 45, no. 1, pp. 52-59 (in Russian).

3. Chipiga A. F., Senokosova A. V. A method to ensure energy security of satellite communication systems. *Cosmic Research*, 2009, vol. 47, no. 5, pp. 393-398 (in Russian).

4. Pashintsev V. P., Tsymbal V. A., Chipiga A. F. Analiticheskaya zavisimost' energeticheskoi skrytnosti sputnikovoi svyazi ot vybora nesushchei chastoty [Analytical dependence of the energy stealth satellite communications from the choice of carrier frequency]. *XVIII scientific and technical conference "Radar, navigation, communication"*, Voronezh, 2012, pp. 2113-2120 (in Russian).

5. Pashintsev V. P., Chipiga A. F., Tsymbal V. A., Shimanov S. N. Procedure for calculating the dependence of the energy concealment factor on carrier frequency selection for low-frequency satellite communications system. *Automatic control and computer sciences*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 408–414.

6. Pashintsev V. P., Katkov K. A., Katkov E. K., Gakhova N. N., Gakhov R. P., Titov A. I. Forecast accuracy of determining pseudo range in satellite navigation system through analysis of data from ionosphere monitoring. *Journal Fundamental and Applied Sciences*, 2017, no. 9 (1S), pp. 899-913.

7. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Smirnov V. M., Smirnova E. V., Tynyankin S. I. Procedure for Extraction of Small-Scale Variations in the Total Electron Content of the Ionosphere with the Use of Transionospheric Sounding Data. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, no. 12, pp. 1336–1342.

8. Chipiga A. F., Pashintsev V. P., Tsymbal V. A., Zelenevskiy V. V. Low-Frequency Satellite Communication System Technical Means' Parameters Synthesis by the Requirements for Energetic Concealment and Noise Immunity. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 243–249.

9. Kamenev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. V. *Sputnikovye seti svyazi* [Satellite communication networks]. Moscow, Al'pina Pablisher, 2004, 256 p. (in Russian).

10. Yurtsev O. A., Runov A. V., Kazarin A. N. *Spiral'nye anteny* [Helical antennas], Moscow, Sov. radio Publ., 1974, 224 p. (in Russian).

Статья поступила 15 ноября 2018 г.

Информация об авторах

Пашинцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи и навигации. E-mail: pasintsevp@mail.ru

Чипига Александр Федорович – кандидат технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: моделирование трансionoсферного распространения радиоволн, защита информации в системах космической связи. E-mail: chipiga.alexander@gmail.com

Анзин Иван Викторович – аспирант. Преподаватель кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: математическое и имитационное моделирование ионосферных сцинтилляций в системах спутниковой связи и навигации. E-mail: van356@mail.ru

Адрес: Россия, 355029, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д.1

Stealth Energy of the Low-Orbit Low-Frequency Satellite Communication System in Any Removing the Radio Transmission Receiver

V. P. Pashintsev, A. F. Chipiga, I. V. Anzin

Statement of the problem. A method is known for increasing the energy concealment of satellite communication systems (SCS) with close placement of the radio-intercepting receiver by lowering the carrier frequency and using of space-diversity reception of signals. However, it contradicts the traditional method of increasing the energy concealment of the SCS at remote placement of the radio-intercepting receiver due to the narrowing of the radiation pattern of the transmitting antenna of the AES (artificial earth satellite). Therefore, it is necessary to investigate the possibility of ensuring the energy concealment of low-frequency SCS with arbitrary placement of the radio-intercepting receiver due to the use of low-orbit AES and narrowing the radiation pattern of the transmitting antenna to reduce the service area to the borders of Russia. **The aim of the work** is to develop a technique for assessing the energy concealment of low-orbit low-frequency SCS when choosing the width of the directional pattern of the transmitting antenna of the AES by the level of zero radiation within the borders of Russia and arbitrary removal of the radio-intercepting receiver. **Novelty:** it consists in theoretical generalization of two methods of increasing the energy concealment of the SCS: through the use of a reduced carrier frequency and space-diversity reception of signals and by increasing the spatial stealth by reducing the altitude of the orbit of the satellite and narrowing the directional pattern of the transmitting antenna. **Result:** a three-stage method for obtaining the analytical dependence of the SCS energy concealment on the removal of the radio-intercepting receiver in the form of a product of the spatial stealth coefficient (conditioned to the directional pattern of the transmitting antenna of the AES and the orbit height) and advantage from the use of spatially spaced reception and frequency reduction is developed.

Practical significance: the obtained dependence indicates the possibility of providing a very high-energy concealment coefficient of low-frequency SCS (more than 28 dB) at arbitrary removal of the radio intercepting receiver. At its close location, the high energy concealment of the low-frequency SCS is provided on account the spatially spaced reception of the fading signals, and at a distance of more than 740 km - due to the spatial concealment of the radiation of the transmitting antenna of the AES with an orbit height of 700 km.

Key words: satellite communication, energy concealment, reduced frequency, antenna pattern, space-spaced signal reception.

Information about Author

Vladimir Petrovich Pashintsev – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of at the Department of "Information Security of Automated Systems". North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of satellite communication and navigation systems. E-mail: pasintsevp@mail.ru

Chipiga Alexander Fedorovich – Ph.D. of Engineering Sciences, Professor. Head of Department "Information Security of Automated Systems". North Caucasus Federal University. Field of research: modeling transionospheric propagation of radio waves, information security in space communication systems. E-mail: chipiga.alexander@gmail.com

Ivan Viktorovich Anzin– Postgraduate student. Lecture at the department of "Information Security of Automated Systems". North Caucasus Federal University. Field of research: mathematical and simulation modeling of ionospheric scintillations in satellite communication and navigation systems. E-mail: van356@mail.ru

Address: Russia, 355029, Stavropol, Pushkina street, 1.