

УДК 621.372+621.91

Численные модели помехоустойчивости для украинских региональных сетей спутниковой связи

А. С. Мазманишвили, О. Я. Рафалович

Харківський політехнічний університет, Харків

Надійшла до редакції 23.06.97

Розглянуто проблему перешкодостійкості та задачу розрахунку ймовірності похибки при передаванні когерентних фазоманіпульованих сигналів супутниковими передавачами на геостационарній орбіті. На основі математичної моделі побудовано алгоритм розрахунку ймовірності похибки при передаванні одного бінарного символу, який ґрунтується на методі Монте-Карло. Приведено результати чисельного моделювання ймовірності похибки та їх інтерпретація. Побудовано атлас ймовірнісних залежностей для різних конфігурацій супутникової системи прийому/передачі. Представлено алгоритми розрахунку карт ймовірності похибки (інформаційні карти), що орієнтовані на задані географічні регіони. За допомогою таких карт розглянуто різні супутникові конфігурації для системи зв'язку України.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение потребностей связи и объема информации приводят к тому, что за последние годы существенно возрос интерес к качеству передачи цифровых сигналов в условиях помех [3, 8—10]. Показатели качества цифровой системы сложным образом зависят от устройства самой системы и внешних факторов, одним из которых являются помехи.

Связные спутники, работающие на геостационарной орбите (ГО), характеризуются широким разнообразием параметров и выполняют множество функций. Общий анализ эффективности использования орбиты при произвольной конфигурации спутниковой системы связи (ССС) достаточно сложен. Для исследования помехоустойчивости обычно используют упрощенную модель, в рамках которой допускаются следующие основные допущения [15, 18, 19]:

- 1) на всей орбите находятся идентичные спутники, равноотстоящие друг от друга;
- 2) все спутники несут на борту однолучевые антенны с глобальной зоной обслуживания и одинаковой поляризацией;

наковой поляризацией;

3) работа осуществляется при ясных погодных условиях;

4) все спутники передают когерентно фазоманипулированные (КФМ) несущие с идентичными параметрами;

5) предполагается наличие идеального фазового приемника, не искажающего сигнал.

Тогда основная формула, на базе которой рассчитывается вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ при передаче одного бинарного символа, для случая, когда на ГО находится K «мешающих» передающих спутников, угловой разнос между которыми составляет $\Delta\theta$ градусов, имеет в общем случае следующий вид [15]:

$$P_{\text{ош}}(x, y) = E[\text{erfc}(\rho(x, y)S + \rho(x, y)Z(x, y))], \quad (1)$$

где x, y — координаты точки приема; $E[.]$ — символ безусловного математического ожидания;

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$$

— дополнительная функция ошибок; $S = \sin(\pi/M)$

— мощность полезного сигнала; M — число положений фаз при фазовой манипуляции; $\rho^2 = P_s/P_n$ — величина отношения сигнал/шум по мощности в точке приема.

Для помехи, связанной с соседними спутниками, эта случайная величина следующая:

$$Z = \sum_{j \in C}^K R_j \cos(\varphi_j), \quad (2)$$

при этом каждая из случайных величин φ_j равномерно распределена на отрезке $(0, 2\pi)$; K — число «мешающих» космических станций (КС); $R_j = \sqrt{I_j/S}$; I_j — мощность мешающего сигнала от j -го спутника; C — конфигурация системы связи (например, на рис. 1 конфигурация C следующая: $-1, 1$).

В качестве набора $\{R_j\}$ на линии спутник—Земля принято использовать последовательность [3, 13, 14]

$$R_j = \sqrt{[G_{es}(\theta_j)G_{ss}(\beta_j)P_j]/[(G_{es, \max}G_{ss, \max}P_0)]}, \quad (3)$$

$$1 \leq j \leq K.$$

Здесь $G_{es, \max} = \eta(\pi D/\lambda)^2$ — коэффициент усиления мощности антенны земной станции (ЗС) в главном лепестке; η — коэффициент использования поверхности антенны ЗС; D/λ — отношение апертуры к длине волны ЗС; θ_j — топоцентрический угол разности между «полезным» и j -м «мешающим» спутником на ГО; $G_{es}(\theta_j)$ — соответствующий коэффициент усиления мощности антенны ЗС в направлении на j -й источник мешающего сигнала при угловом смещении θ_j ; $G_{ss, \max} = 44.44 - 20 \lg \gamma$ — максимальное усиление антенны КС в основном лепестке, дБ; γ — угловой размер сечения луча антенны КС; $G_{ss}(\beta_j)$ — соответствующий коэффициент усиления мощности j -й «мешающей» КС в направлении на ЗС под углом β_j от направления максимального излучения (точки прицеливания); P_0 — мощность бортового передатчика «полезной» КС; P_j — мощность бортового передатчика j -й «мешающей» КС.

Соотношения (2) и (3) дают возможность полностью математически поставить задачу нахождения вероятности ошибки (1).

Ниже будет изложен алгоритм, позволяющий получать гарантированную оценку вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ (1) для заданной точки приема, и дано статистическое обоснование используемых численных процедур. Это позволит рассчитать ряд зависимостей $P_{\text{ош}}$ для различных конфигураций ССС и связанных с ними параметров. Далее этот алгоритм

будет распространен для набора пространственных узлов (при выбранной конфигурации ССС), ориентированных на совокупность регионов Украины. При всей условности выбора этих регионов и самой конфигурации системы связи полученные сведения могут оказаться полезными при проектировании ССС различного назначения.

В качестве основного инструмента, характеризующего качество ССС, нами будет далее использована информационная карта (ИК). Так же, как географическая или метеорологическая карты, типичная ИК содержит $P_{\text{ош}}$ как функцию двух географических координат в заданном регионе. Целенаправленно варьируя конфигурацией или параметрами ССС, можно рассчитывать и далее сравнивать набор (атлас) подобных ИК и тем самым выбирать оптимальную ССС с точки зрения фиксированного критерия.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ

Метод гауссового приближения. В рекомендациях МККР указано на возможность использования при расчете вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ гауссового приближения для плотности распределения $p(z)$ амплитуды случайной помехи Z . В этом случае вероятность ошибки определяется на основе выражения [2, 13]

$$P_{\text{ош}} = \int_{-\infty}^{\infty} p(z) \operatorname{erfc}(\rho S + \rho z) dz,$$

где

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{z^2}{\sigma^2}\right);$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \sum_{j \in C}^K R_j^2$$

— дисперсия случайной величины Z . После интегрирования получим

$$P_{\text{ош}} = \operatorname{erfc}[\rho S(1 + 2\rho^2\sigma^2)^{-1/2}]. \quad (4)$$

Выражение (4) дает удовлетворительное описание вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ лишь в случае, когда $\sigma \ll \sin(\pi/M)$. Этому условию отвечает ситуация, когда угловое расстояние $\Delta\theta$ между спутниками на ГО достаточно велико, т. е. $\Delta\theta > 1.5^\circ$ (при $M = 2$ и $K \leq 5$. При $M > 2$ и $K > 5$ это ограничение еще более усиливается [4].

Возросшая интенсивность использования ГО приводит к необходимости уменьшения углового ин-

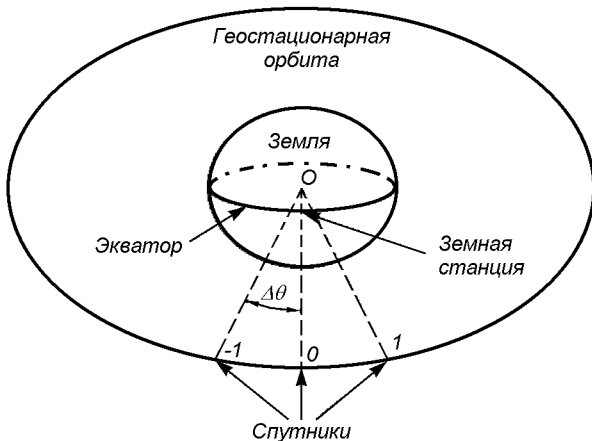


Рис. 1. Пример размещения спутников на ГО (0 — «полезный» спутник, -1, 1 — «мешающие» спутники-передатчики, O — центр Земли)

тервала. Для малых величин $\Delta\theta$ гауссово приближение становится неприменимым. Это вытекает, в частности, из того, что при $\rho \gg 1$ вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$, вычисленная согласно (4), стремится к постоянной величине, равной $\text{erfc}[S(\sqrt{2}\sigma)^{-1}]$. Тем самым вероятность ошибки перестает зависеть от величины отношения сигнал/шум ρ^2 .

Поэтому необходим алгоритм расчета, позволяющий получать более точные оценки вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ при передаче одного бинарного символа.

Метод Джерухима. В работах [15, 16] развит следующий подход к задаче нахождения $P_{\text{ош}}$. Математическое ожидание (1) ищется относительно случайной величины Z :

$$P_{\text{ош}} = \int_D p(z) \text{erfc}(\rho S + \rho z) dz. \quad (5)$$

Здесь D — область значений Z , а $p(z)$ — плотность распределения вероятностей. Очевидно, что область D задается неравенством

$$-\Omega_C \leq Z \leq \Omega_C, \quad \Omega_C = \sum_{j \in C} R_j. \quad (6)$$

Плотность $p(z)$ можно определить следующим образом:

$$p(z) = E \left[\delta \left(z - \sum_{j \in C} R_j \cos \varphi_j \right) \right],$$

здесь $\delta(\cdot)$ — функция Дирака, а усреднение осуществляется по всем возможным значениям φ_j . Для вероятности ошибки получим

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_D \cos(tz) \text{erfc}(\rho S + \rho t) \prod_{j \in C} J_0(tR_j) dt dz, \quad (7)$$

где $J_0(\cdot)$ — функция Бесселя.

Найденное выражение дает аналитическое решение в квадратурах для $P_{\text{ош}}$. С вычислительной точки зрения это выражение не может служить основой для создания алгоритма, пригодного для построения программного средства. Это обусловлено следующими причинами:

1) в формуле (7) есть косинус и функции Бесселя, известные своими осцилляционными свойствами. Между тем построение алгоритма интегрирования с осциллирующей подынтегральной функцией — задача, на настоящее время не решенная в полном объеме. Здесь же мы имеем дело с интегралом кратности не меньше, чем K и таким же количеством осциллирующих функций в подынтегральном выражении;

2) объем вычислений с увеличением кратности интеграла K увеличивается пропорционально L^{K+1} , где L — число операций, нужное для вычисления одного интеграла [11]. Мы приходим к положению, когда, с одной стороны, требуется алгоритм, возможно универсальный, для K вплоть до 40, а с другой — число операций увеличивается по K степенным образом.

Попытаемся разработать метод быстрого и «точного» расчета вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ $P_{\text{ош}}$

Метод статистических испытаний. Рассматриваемая в данной работе задача может быть решена методом Монте-Карло [1].

Вернемся к формуле (1) для $P_{\text{ош}}$. Следуя методу Монте-Карло, рассмотрим набор, образованный последовательностью независимых величин θ_j . Каждая из этих величин является случайной величиной с плотностью распределения $f(\theta_j) = (2\pi)^{-1}$, если $0 \leq \theta_j \leq 2\pi$, и $f(\theta_j) = 0$ в противном случае. Тогда из (1) следует

$$P_{\text{ош}} = (2\pi)^{-K} \int_0^{2\pi} d\theta_1 \dots \int_0^{2\pi} d\theta_K \text{erfc} \left(\rho S + \rho \sum_{j \in C} R_j \cos \theta_j \right). \quad (8)$$

Случайный вектор $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_K)$ равномерно заполняет пространство, ограниченное гиперкубом со стороной, равной 2π . Функция $\text{erfc}(x)$ непрерывна и ограничена, и поэтому абсолютно интегрируема. Тогда

$$P_{\text{ош}} = E_{\Theta} \left[\text{erfc} \left(\rho S + \rho \sum_{j \in C} R_j \cos \Theta_j \right) \right],$$

где $E_{\Theta}[\cdot]$ — математическое ожидание относительно случайного вектора Θ .

Построим последовательность значений, образованную из реализаций случайного вектора Θ . Выполнив вычисления в соответствии с формулой

$$y_n = \operatorname{erfc} \left(\rho S + \rho \sum_{j \in C} R_j \cos \theta_{nj} \right),$$

получим последовательность y_1, y_2, \dots, y_N возможных значений случайной величины

$$Y_n = \operatorname{erfc} \left(\rho S + \rho \sum_{j \in C} R_j \cos \Theta_{nj} \right).$$

Из способа образования последовательности y_n вытекает, что случайные величины Y_n взаимно независимы и имеют один и тот же закон распределения. Поэтому, воспользовавшись законом больших чисел теории вероятностей, получим следующий алгоритм численной оценки вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$:

$$\hat{P}_{\text{ош}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \operatorname{erfc} \left(\rho S + \rho \sum_{j \in C} R_j \cos \theta_{nj} \right), \quad (9)$$

где $\theta_{n1}, \theta_{n2}, \dots, \theta_{nK}$ — компоненты случайного вектора θ_n . Здесь важно отметить, что требуемый объем вычислений зависит от K уже не по степенному закону, а увеличивается пропорционально K (при фиксированных остальных параметрах).

Найдем величину необходимого объема статистических испытаний N для оценки вероятности ошибки $\hat{P}_{\text{ош}}$ при заданной доверительной вероятности и доверительном интервале.

Пусть с вероятностью q относительная погрешность оценки $\hat{P}_{\text{ош}}$ величины $P_{\text{ош}}$ не превышает α , т. е.

$$\operatorname{Prob} \left\{ \alpha P_{\text{ош}} (\mathbf{D}_N [\hat{P}_{\text{ош}}])^{-1/2} \leq \gamma \right\} = q. \quad (10)$$

Здесь $\alpha = |P_{\text{ош}} - \hat{P}_{\text{ош}}|/P_{\text{ош}}$; $\gamma = \Phi^{-1}(q)$; $\Phi(q)$ — функция Лапласа; $\mathbf{D}_N [P_{\text{ош}}]$ — дисперсия оценки искомой величины $\hat{P}_{\text{ош}}$:

$$\mathbf{D}_N [\hat{P}_{\text{ош}}] = \frac{1}{N} \mathbf{E} [\operatorname{erfc}^2(\rho S + \rho Z) - \{ \mathbf{E} [\operatorname{erfc}(\rho S + \rho Z)] \}^2]. \quad (11)$$

Далее рассмотрим худший случай. Используем в качестве мажорирующей плотности распределения вероятностей функцию $p(z) = (2\Omega_C)^{-1}$.

Согласно (5) и (6) главный вклад в среднее (11) дает район значений случайной величины Z , прилегающий к точке $-\Omega_C$ справа, что обусловлено сильной нелинейностью функции $\operatorname{erfc}(x)$. Поэтому, учитывая асимптотические свойства функции $\operatorname{erfc}(x)$ [12], после ряда преобразований получим

приближенно

$$\mathbf{D}_N [\hat{P}_{\text{ош}}] \approx \frac{2}{N} P_{\text{ош}}^2 \rho^2 (S - \Omega_C). \quad (12)$$

Полученное выражение содержит интересующую нас зависимость объема выборки N от физических параметров задачи. Объединяя это выражение с (10), найдем искомую формулу

$$N \approx 2\rho^2 \Omega_C (S - \Omega_C) (\gamma/\alpha)^2. \quad (13)$$

Полученная величина — требуемый объем статистической выборки (верхняя граница N). Она гарантирует при выполнении расчета вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ получение ее оценки $\hat{P}_{\text{ош}}$, неотклоняющейся с вероятностью q от истинного значения с относительной погрешностью α .

Отметим, что $N = N(\rho^2)$, т. е. согласно (13) требуемый объем выборки N пропорционально увеличивается с увеличением отношения сигнал/шум и, соответственно, быстрым уменьшением функции $P_{\text{ош}}$. Однако динамический диапазон изменения зависимости $N = N(\rho^2)$ значительно меньше, чем диапазон изменения $P_{\text{ош}}$ для одних и тех же значений ρ^2 .

Выбрав величины вероятности q и доверительного интервала α равными $q = 0.9$ и $\alpha = 0.05$, получим из (13) значение искомого объема выборки:

$$N \approx 2200 \rho^2 \Omega_C (S - \Omega_C). \quad (14)$$

При $M = 4$ (т. е. $S = 2^{-1/2}$) и $\Omega_C = 0.25$ имеем $N \approx 250\rho^2$, а для динамического диапазона величины ρ^2 , составляющего $10 \leq \rho^2 \leq 30$, получим интервал требуемых значений объема выборки: $2.5 \cdot 10^3 \leq N \leq 7.5 \cdot 10^3$.

Поскольку при выводе результата (14) была использована мажорирующая помеховая плотность вида $p(z) = (2\Omega_C)^{-1}$, необходимые на практике значения N оказываются несколько меньше.

Таким образом, совокупность выражений (9) и (14) образует основу следующего числового алгоритма:

- 1) задать требуемый регион и набор пространственных узлов в нем;
- 2) задать конфигурацию C сети связи приема/передачи;
- 3) задать статистические параметры α , q и оценить необходимый объем статистических испытаний N согласно (13);
- 4) оценить вероятность ошибки $P_{\text{ош}}(x, y)$ по формуле (9);
- 5) повторить пункты 3—4 для выбранного набора значений ρ^2 ;
- 6) повторить пункты 3—4 для набора простран-

ственных узлов.

На основе пп. 1—4 этого алгоритма были выполнены расчеты значений величин $P_{\text{ош}}$ для различных вариантов значений параметров и вариантов рассматриваемых конфигураций.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ $P_{\text{ош}}$

С помощью построенных программных средств по описанному выше алгоритму для исследования поведения зависимости вероятности ошибки от величины сигнал/шум ρ^2 при различных параметрах M , K и $\Delta\theta$ были проведены соответствующие расчеты. Значения амплитуд R_j выбирались по правилу (3). Полученные результаты приведены в работе [4]. Созданы атласы зависимостей $P_{\text{ош}}(\rho)$ для разных значений параметров M , K и $\Delta\theta$ [7].

На рис. 2—4 показаны типичные зависимости $P_{\text{ош}}$ от ρ^2 для разных значений M , K и $\Delta\theta$.

Видно, что при увеличении пространственного разнеса $\Delta\theta$ спутников по ГО и фиксированных M и K вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ уменьшается (рис. 2). При увеличении параметра M (рис. 3) или при

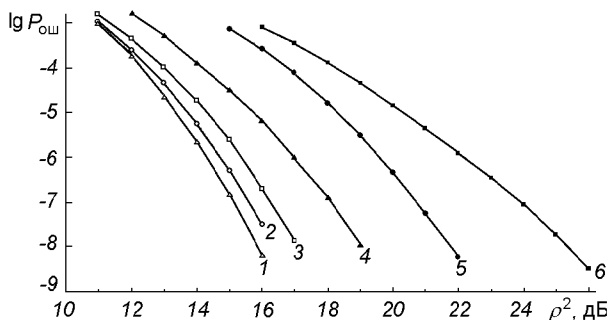


Рис. 2. Зависимость $P_{\text{ош}}$ от величины сигнал/шум ρ^2 для $M = 4$, $K = 40$: кривая 1 — для $\Delta\theta = 3^\circ$, 2 — 2.5° , 3 — 2° , 4 — 1.5° , 5 — 1.25° , 6 — 1.1°

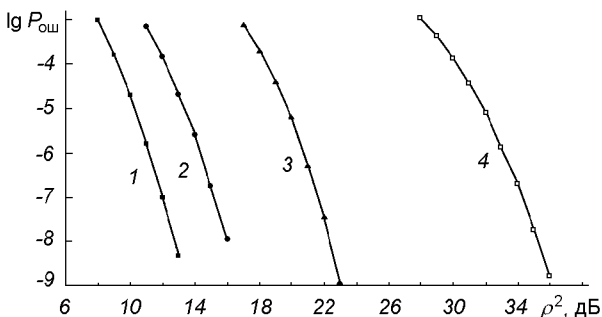


Рис. 3. Зависимость $P_{\text{ош}}$ от величины сигнал/шум ρ^2 для $K = 40$, $\Delta\theta = 3.0^\circ$: кривая 1 — для $M = 2$, 2 — $M = 4$, 3 — $M = 8$, 4 — $M = 16$

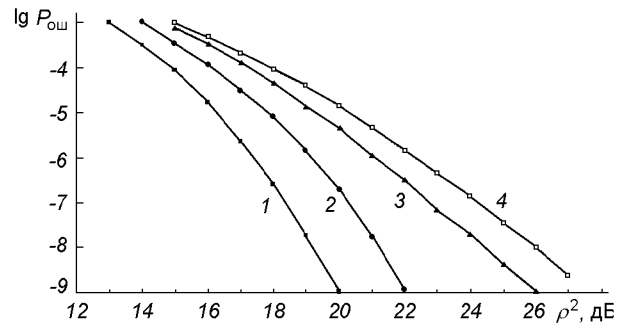


Рис. 4. Зависимость $P_{\text{ош}}$ от величины сигнал/шум ρ^2 (дБ) для $M = 4$, $\Delta\theta = 1.1^\circ$: кривая 1 — для $K = 2$, 2 — $K = 4$, 3 — $K = 10$, 4 — $K = 40$

увеличении числа «мешающих» спутников K (рис. 4) наблюдается увеличение $P_{\text{ош}}$. Увеличение количества «мешающих» спутников (при $K \geq 10$ и $\Delta\theta = \text{const}$) приводит к малому увеличению $P_{\text{ош}}$. Это связано с их большим удалением от «полезного» спутника, что приводит к их незначительному вкладу в общую мощность помехи.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАРТЫ

Как отмечалось выше, каждое из значений $P_{\text{ош}}$ соотносится с заданной точкой приема с координатами x , y . Изменяя эти координаты целенаправленным образом, можно образовать значения $P_{\text{ош}}$ в виде двумерного массива, получив тем самым фазовую (информационную) карту. Подобно метеорологическим, карты подобного вида содержат информацию в виде двумерного поля [17].

В настоящей работе рассматриваются фазовые карты двух типов: энергетические и информационные. Первые из них описывают пространственное распределение суммарного электромагнитного поля излучения для выбранной конфигурации системы связи, действующей в выбранном регионе. Вторые несут информацию о распределении значения вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ в том же регионе и при той же конфигурации. Сопоставление информации, содержащейся в очередной паре карт, позволяет выбирать те или иные подходящие варианты приема/передачи, виды нацеливания, угловые характеристики и т. д.

На основе справочных характеристик эксплуатируемых систем спутниковой связи [3, 14] и метода статистических испытаний были построены алгоритмы расчета энергетических и информационных фазовых карт. Проиллюстрируем возможности со-

зданных программных средств на некоторых упрощенных ССС.

В качестве примера были изучены глобальные регионы, включающие крупные населенные пункты Украины или страну в целом. С помощью программного обеспечения были получены фазовые карты (рис. 5—10) для упрощенной ССС на ГО и рассмотрены системы связи с одним, двумя и четырьмя спутниками-передатчиками на ГО. При моделировании были использованы данные, наиболее характерные для эксплуатируемых в настоящее время систем.

Системы связи с одним спутником-передатчиком. Рассмотрим ССС с одним спутником-передатчиком на ГО.

На рис. 5 представлена фазовая карта вероятности ошибок для случая, когда помех нет. На качество приема в этом случае влияет величина отношения сигнал/шум, которая зависит от координат приема. В рассматриваемом регионе вероятность ошибки на 90 % территории не превышает величины 10^{-9} . Такая величина вероятности ошибки является вполне приемлемой для выбранных систем связи. Для случая появления помехи с заданными характеристиками территория приема информации с той же вероятностью ошибки уменьшается до 35 % (рис. 6). При дальнейшем увеличении количества источников помех территория с приемлемой помеховой обстановкой суживается.

Основные параметры расчета: тип модуляции — фазовая модуляция с $M = 4$; коэффициент использования поверхности антенны ЗС $\eta = 0.5$; отношение диаметра антенны к длине волны ЗС $D/\lambda = 100$; мощность шума на входе приемника $P_{\text{ш}} = 40$ дБ·Вт; угловой размер сечения луча антенн КС $\gamma = 4^\circ$; половина ширины основного лепестка луча антенн КС по уровню -3 дБ $\beta_h = 1.5^\circ$. Остальные характеристики системы приведены в табл. 1. В случае функционирования системы без внешних помех (рис. 5) работает только спутник 0, а в случае наличия внешних помех (рис. 6) работают спутники 1 и 2 (см. табл. 1). Для спутников 1, 2 угловой размер сечения луча антенн КС $\gamma = 1^\circ$, половина ширины основного лепестка луча антенн КС по уровню -3 дБ составляет $\beta_h = 0.5^\circ$.

Конфигурация спутников-передатчиков 1 и 2 связана с расположением крупных населенных пунктов (Кишинев, Ростов).

Системы связи с двумя спутниками-передатчиками. Рассмотрим спутниковые системы связи с несколькими «полезными» спутниками-передатчиками на ГО. Такие системы являются наиболее преобладающими в настоящее время.

На рис. 7 и 8 приведены соответственно энерге-

Таблица 1. Характеристики системы с одним спутником-передатчиком

Тип спутника	Расположение на ГО	Точка прицеливания луча антенны	Мощность бортового передатчика
Полезный (0)	32.0° в. д.	49.00° с. ш., 32.00° в. д.	450 Вт
Мешающий (1)	31.0° в. д.	46.90° с. ш., 28.50° в. д.	450 Вт
Мешающий (2)	33.0° в. д.	47.30° с. ш., 39.60° в. д.	450 Вт

Таблица 2. Характеристики системы с двумя спутниками-передатчиками

Зона обслуживания	Расположение на ГО	Точка прицеливания луча антенны	Мощность бортового передатчика
Западная	30.0° в. д.	49.00° с. ш., 26.00° в. д.	100 Вт
Восточная	31.5° в. д.	49.00° с. ш., 35.00° в. д.	100 Вт

тическая карта величины сигнал/помеха и карта вероятности ошибки для системы глобальной спутниковой связи Украины с двумя спутниками-передатчиками на геостационарной орбите. На информационной карте отчетливо видны зоны приема с вероятностью ошибки $P_{\text{ош}} < 10^{-9}$. Вместе с тем существуют региональная зона (погранслои), в которой качество приема заметно ухудшено. Основные параметры расчета: тип модуляции — фазовая модуляция с $M = 4$; коэффициент использования поверхности антенны ЗС $\eta = 0.5$; отношение диаметра антенны к длине волны ЗС $D/\lambda = 100$; мощность шума на входе приемника $P_{\text{ш}} = 40$ дБ·Вт; угловой размер сечения луча антенн КС $\gamma = 1.4^\circ$; половина ширины основного лепестка луча антенн КС по уровню -3 дБ составляет $\beta_h = 1.5^\circ$. Остальные характеристики системы приведены в табл. 2.

Системы связи с четырьмя спутниками-передатчиками. На рис. 9 и 10 приведены соответственно энергетическая карта величины сигнал/помеха и карта вероятности ошибки для системы глобальной спутниковой связи Украины с четырьмя спутниками-передатчиками на геостационарной орбите. Выбор такого рода конфигурации обусловлен, прежде всего, профилем государственных границ Украины и необходимостью учета интересов сопредельных стран.

Основные параметры расчета: тип модуляции — фазовая модуляция с $M = 4$; коэффициент использования поверхности антенны ЗС $\eta = 0.5$; отноше-

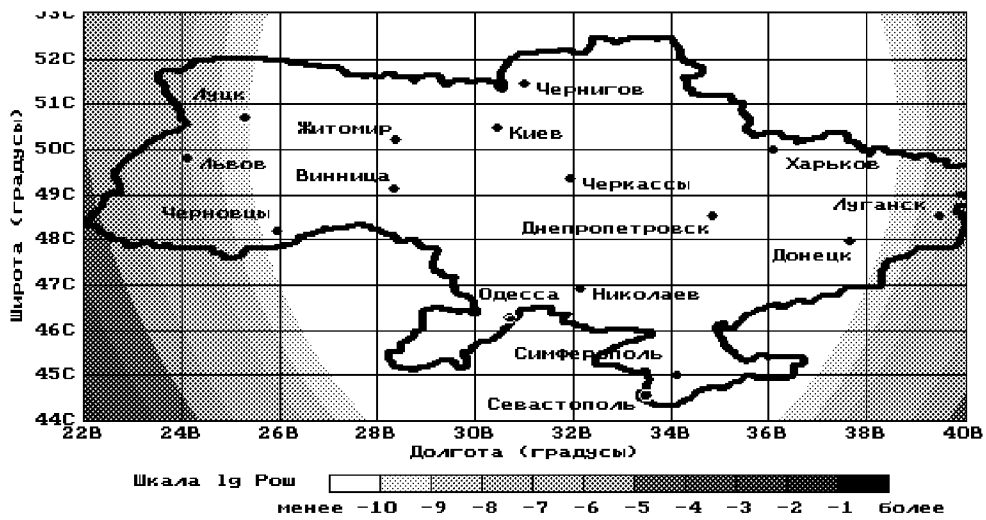


Рис. 5. Информационная карта $P_{om}(x, y)$ для системы с одним спутником-передатчиком на ГО без внешних помех

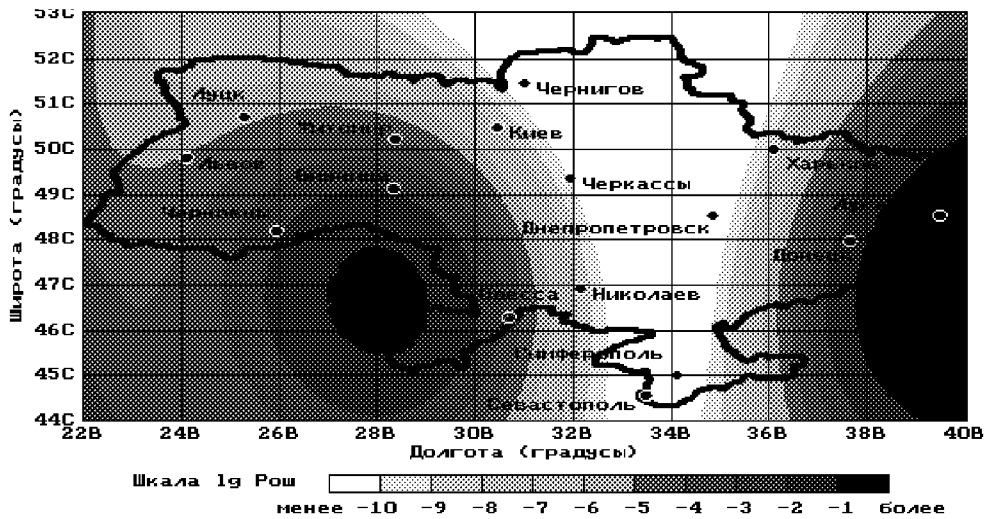


Рис. 6. Информационная карта $P_{om}(x, y)$ для системы с одним спутником-передатчиком на ГО и двумя внешними помехами

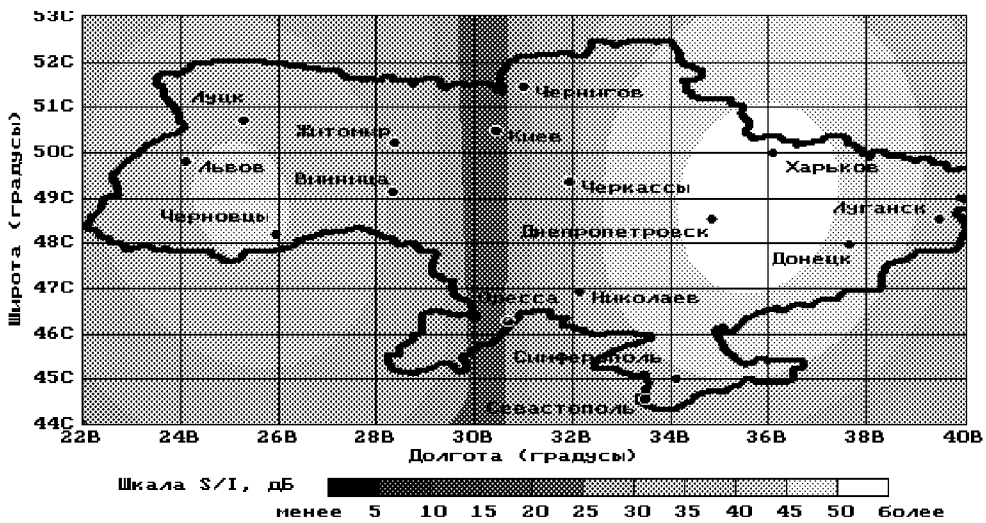


Рис. 7. Энергетическая карта величины сигнал/помеха для ССС Украины с двумя спутниками-передатчиками на ГО

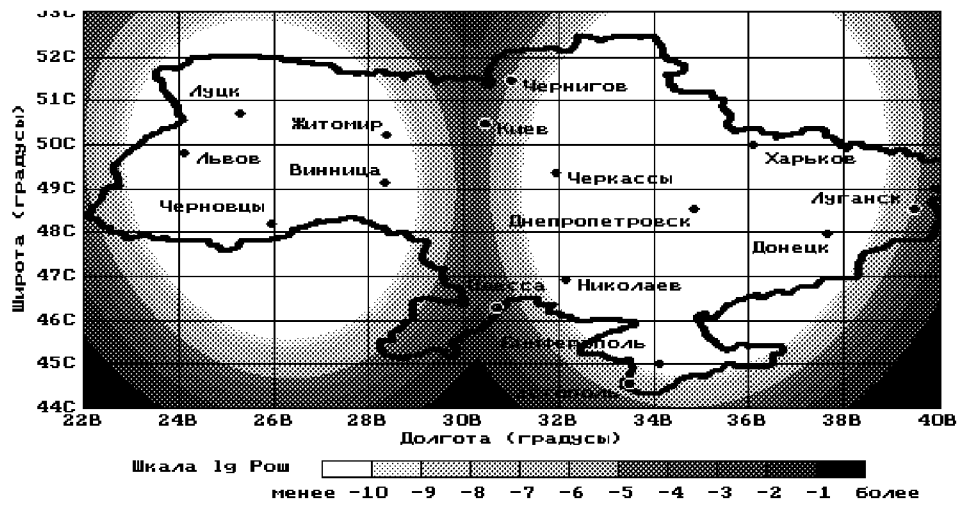


Рис. 8. Информационная карта $P_{ош}(x, y)$ для системы глобальной спутниковой связи Украины с двумя спутниками-передатчиками на ГО

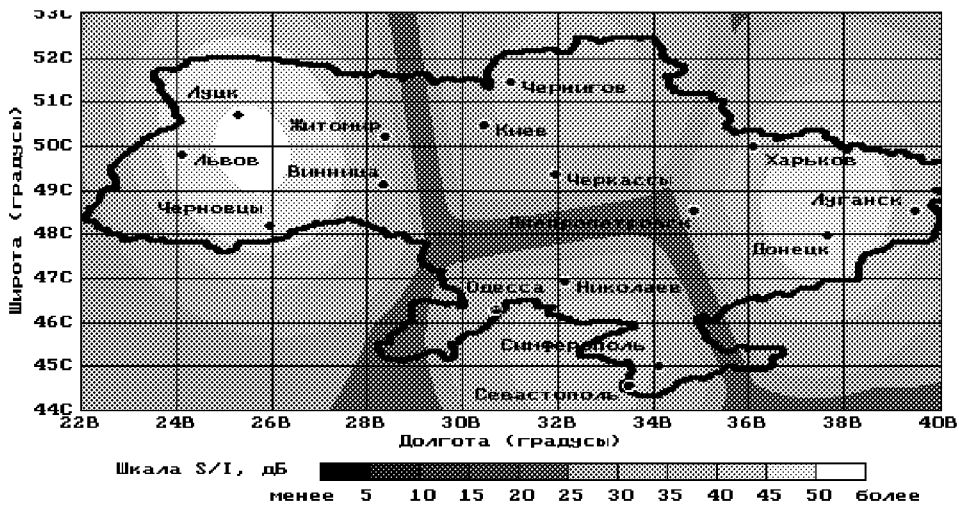


Рис. 9. Энергетическая карта величины сигнал/помеха для ССС Украины с четырьмя спутниками-передатчиками на ГО

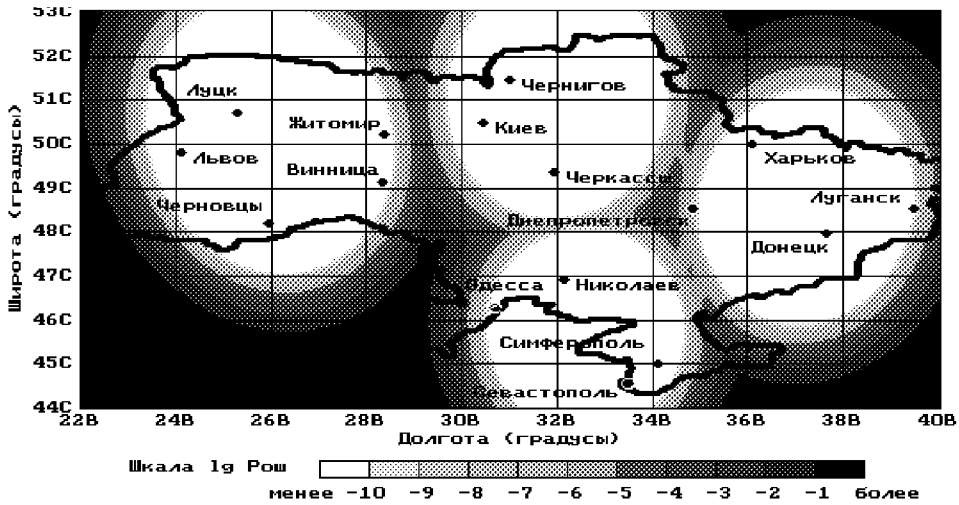


Рис. 10. Информационная карта $P_{ош}(x, y)$ для системы глобальной спутниковой связи Украины с четырьмя спутниками-передатчиками на ГО

Таблица 3. Характеристики системы с четырьмя спутниками-передатчиками

Зона обслуживания	Расположение на ГО	Точка прицеливания луча антенны	Мощность бортового передатчика
Западная	30.0° в. д.	50.00° с. ш., 26.00° в. д.	150 Вт
Южная	31.5° в. д.	45.70° с. ш., 32.60° в. д.	90 Вт
Центральная	33.0° в. д.	50.90° с. ш., 32.00° в. д.	90 Вт
Восточная	34.5° в. д.	48.47° с. ш., 37.20° в. д.	100 Вт

ние диаметра антенны к длине волны ЗС $D/\lambda = 100$; мощность шума на входе приемника $P_{\text{ш}} = 40$ дБ·Вт; угловой размер сечения луча антенн КС $\gamma = 1.0^\circ$; половина ширины основного лепестка луча антенн КС по уровню -3 дБ составляет $\beta_h = 0.3^\circ$.

Остальные характеристики системы приведены в табл. 3.

Из рис. 10 видно, что имеются зоны с возможностью надежного информационного обеспечения при передаче со спутников на ГО, что и имеет место на практике. Важным оказывается то обстоятельство, что между зонами уверенного приема располагаются промежуточные зоны (погранслои), прием в которых всегда заведомо хуже вследствие взаимовлияния передатчиков. Уменьшить эти зоны информационной недостаточности при одночастотном режиме передачи возможно лишь путем улучшения угловой избирательности приемника. Этот путь однако сопряжен с техническими затруднениями [3, 14].

Можно прийти к выводу, что ухудшение качественных показателей приемной системы Земля—спутник увеличивается с увеличением суммарной мощности мешающих сигналов. В случае, когда мощность суммарных помех того же порядка (или меньше), что и мощность шума, влияние помех проявляется не столь сильно, как влияние теплового шума равной мощности на характеристики приемной земной станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен быстрый алгоритм оценки и рассмотрены «точный» и приближенные алгоритмы вычисления вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ в системах с фазовой манипуляцией, подверженных воздействию многомодовой помехи. Рассмотрены возможные области применения предложенных алгоритмов. Приведены примеры расчета вероятности ошибки одного бинарного символа, возникающей в

различных помеховых обстановках, что обеспечивает получение информации о качестве передачи информации.

Хотя в данной работе рассматриваются лишь когерентные системы с фазовой манипуляцией, которые получили наибольшее распространение в спутниковой связи, вполне возможно расширение развитого подхода и на другие виды манипуляции.

Представленные в настоящей работе карты вероятности ошибки описывают потенциальную помехоустойчивость спутниковых систем связи для выбранных регионов Украины. Аналогичную задачу можно рассмотреть и для выбранных регионов России и других стран.

Полученные численные характеристики вероятности ошибки позволяют оценить степень помехозащищенности системы при передаче и приеме сигналов потребителями в регионе. На основе таких характеристик и заданных региональных критериев качества можно ставить и разрешать задачу синтеза оптимальной конфигурации системы спутниковой связи.

1. Бусленко Н. П., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний. — М.: Физматгиз, 1961.—280 с.
2. Калашников Н. И. Системы связи через ИСЗ. — М.: Связь, 1969.—383 с.
3. Кантор Л. Я., Тимофеев В. В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. — М.: Радио и связь, 1988.—168 с.
4. Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Оценка вероятности ошибок взаимовлияния при передаче дискретной информации в системах спутниковой связи // Электронное моделирование.—1995.—17, № 4.—С. 94—95.
5. Рафалович О. Я. Числовые характеристики помехоустойчивости многоканальной системы связи спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите. Программное обеспечение. — Киев, 1994.—17 с.—(Рукопись деп. в ГНТБУ 05.12.1994, №2286-УК94).
6. Рафалович О. Я. Числовые характеристики помехоустойчивости многоканальной системы связи спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите. Односторонняя конфигурация ретрансляторов. — Киев, 1994.—28 с.—(Рукопись деп. в ГНТБУ 15.12.1994, № 2476-УК94).
7. Рафалович О. Я. Числовые характеристики помехоустойчивости многоканальной системы связи спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите. Двусторонняя конфигурация ретрансляторов. — Киев, 1994.—27 с.—(Рукопись деп. в ГНТБУ 15.12.1994, № 2477-УК94).
8. Соколов В. В., Могучев В. И., Пыльцов В. А., Фомин А. Н. Оценка возможностей систем спутниковой связи с различными видами орбит космических аппаратов // Заруб. радиоэлектроника.—1996.—№ 2.—С. 64—68.
9. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. — М.: Связь, 1979.—592 с.
10. Уизерс Д. Дж. Эффективное использование геостационарной орбиты для спутниковой связи // ТИИЭР.—1977.—65, № 3.—С. 26—37.
11. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер М. Машинные методы математических вычислений. — М.: Мир, 1980.—279 с.

12. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1968.—344 с.
13. International Radio Consultative Committee: Documents of XVth Plenary Assembly. — Geneva: ITU, 1982.—Vol. IV/IX-2.—218 p.
14. International Radio Consultative Committee: Documents of XVIth Plenary Assembly. — Geneva: ITU, 1986.—Vol. IV-1, rep. 388.—P. 115—136.
15. Jeruchim M. S. A survey PSK error interference problems and applications to geostationary satellite networks // Proc. IEEE.—1977.—65.—P. 317—331.
16. Jeruchim M. C., Lilley F. E. Spacing limitations of geostationary satellites using multilevel coherent PSK signals // IEEE Trans. Commun.—1972.—COM-20.—P. 1021—1026.
17. Mazmanishvili A. S., Rafalovich O. Ya. Error probability region map for China geostationary satellite communication network // Proc. of Fourth Ukraine-Russia-China Symp. on Space Science and Technology. — Kiev, 1996.—Vol. 2.—P. 704—705.
18. Prabhu V. K. Error probability of M-ary CPSK systems with intersymbol Interference // IEEE Trans. Comm. Tech.—1973.—P. 97—109.
19. Rosenbaum A. S. Error Performance of Multiphase DPSK with Noise and Interference // IEEE Trans. Comm. Tech.—1970.—P. 821—824.
20. Rosenbaum A. S. PSK error performance with gaussian noise and interference // Bell Syst. Tech. J.—1974.—2, № 2.—P. 413—442.

**NUMERICAL NOISE-STABILITY MODELING
OF UKRAINIAN REGIONAL SATELLITE
COMMUNUCATION NETWORKS**

A. S. Mazmanishvili and O. Ya. Rafalovich

The paper deals with the problem of calculating error probability P_{eM} for coherent phase-manipulated signals transmitted from a geostationary satellite. An algorithm based on the Monte-Carlo method is developed for calculating the error probability. The algorithm is compared with the method recommended by CCIR. The P_{eM} -atlas containing probability information is created for satellite networks of various types. Algorithms for developing probability maps for definite geographical regions are built. Satellite networks of various types for the territory of Ukraine are examined using these maps.