

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

### Введение

Системы спутниковой связи (ССС) по-прежнему занимают важное место в обеспечении связи, позволяют удовлетворить срочные потребности в каналах связи, обеспечить быструю переброску групп каналов на другие направления в зависимости от изменения трафика, организовать оперативную связь в условиях стихийных бедствий и катастроф.

Современные технологии спутниковых телекоммуникаций обеспечивают большую гибкость при создании сетей ведомственной и деловой связи в интересах государственных и коммерческих структур, при организации некоммутируемых каналов для построения компьютерных сетей на обширных территориях, обеспечивают возможность предоставления одновременно нескольких видов услуг с помощью одной станции спутниковой связи (передача данных, двусторонняя телефонная, видеоконференцсвязь и др.).

В последние годы интенсивно развиваются средства подвижной спутниковой связи и персонального радиовызова. Подвижная спутниковая связь становится особенно актуальной в связи с вводом в действие глобальных систем с использованием низкоорбитальных ретрансляторов. На базе терминалов подвижной спутниковой связи возможно также развертывание сетей фиксированной телефонной связи по типу "переговорных пунктов" в сельской местности, где организация телефонных каналов другими средствами экономически нецелесообразна.

Вместе с тем, требования к качеству связи и предоставляемых услуг телекоммуникаций постоянно возрастает. Обеспечение качества спутниковой связи требует, в свою очередь, постоянного мониторинга радиочастотного спектра и радиочастотных измерений.

### Измерения на цифровой сети, использующей спутниковую связь

Радиочастотные измерения систем спутниковой связи представляют собой большой класс измерений, связанных с анализом радиочастотных каналов и систем спутниковой связи. Структурная схема организации радиочастотных измерений на цифровой сети, использующей спутниковую связь, представлена на рис. 1.

Согласно схеме, радиочастотные измерения входят составной частью в комплекс измерений на сети. Из технологии радиочастотных измерений могут быть исключены измерения параметров цифровых трактов системы передачи и частично измерения каналообразующей аппаратуры, так как они связаны с анализом цифровой сети вне зависимости от среды распространения сигнала.

Основу радиочастотных измерений составляют измерения параметров сигналов, связанные с анализом электромагнитной обстановки во всем спектре, используемом системой передачи.

Основу спутниковых систем передачи составляют спутниковые ретрансляторы. К измерениям ретрансляторов относятся: измерение АЧХ, измерения линейности усилителей, измерение ФЧХ, измерение шумов ретрансляторов.

К измерениям характеристик компонентов радиочастотного тракта относятся измерения параметров модемов, анализ работы усилителей, анализ работы фильтров, измерения уровней собственных тепловых и фазовых шумов элементов радиочастотного тракта, измерения параметров задающих генераторов приемника и передатчика, измерения антенных систем.

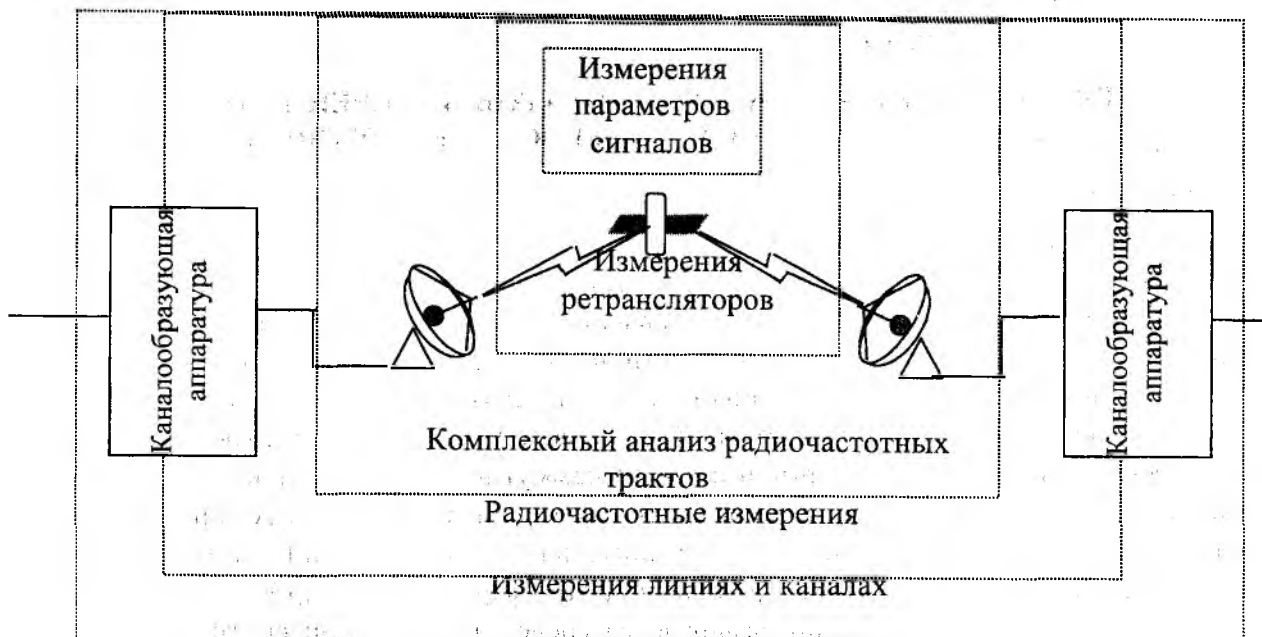


Рис. 1

Все перечисленные выше измерения производятся для того, чтобы добиться требуемого качества связи или наименьшего параметра ошибки в системе передачи. Основным параметром цифровых систем передачи, использующих радиочастотный тракт, является вероятность ошибки (BER). Поэтому окончательные параметры спутниковой системы передачи определяются в виде функциональных зависимостей от BER. Зависимость BER от отношения сигнал/шум (ОСШ) в спутниковой системе передачи практически наиболее важный параметр, так как позволяет учесть вклад всех устройств тракта. Теоретически параметр BER при ОСШ менее 20 дБ составляет более  $10^{-3}$  [1]. На практике BER отличается от теоретического параметра тем, что для заданного значения BER требуется большее значение ОСШ. Это связано с различными причинами ухудшения параметров в трактах ПЧ и РЧ, а также с различного рода замираниями в каналах распространения. Кроме того, в реальных каналах распространения, кроме шумов, присутствуют сосредоточенные по спектру помехи, мощность которых достигает нескольких десятков децибел по отношению к мощности полезного сигнала. Поэтому более адекватной является зависимость BER от отношения сигнал/(помеха+шум) (ОСПШ). В свою очередь, ОСПШ в спутниковых системах связи может существенно изменяться в зависимости от поляризации сигналов и помех.

### Проблемы поляриметрии

Поляризация является физической характеристикой электромагнитного поля (ЭМП), определяющей особенности пространственного расположения и изменения во времени вектора напряженности электрической  $E(t)$  (или магнитной  $H(t)$ ) составляющей.

На практике наличие ЭМП и его параметров в конкретной точке пространства определяются не по составляющим векторов напряженности поля  $E(t,r)$  и  $H(t,r)$ , а по наблюдаемым величинам напряжений  $u(t)$  и токов  $i(t)$ , протекающих в согласованных нагрузках антенных элементов [2]. Напряжение  $u(t)$ , индуцированное полем  $E(t)$  на

согласованной нагрузке антенны, обладающей электрической длиной  $l$ , равно скалярному произведению этих векторов:

$$u(t) = (\vec{E}(t), \vec{l}) = E(t)l \cos(\widehat{\vec{E}(t), \vec{l}}). \quad (1)$$

При этом задача приема антенной ЭМП состоит в получении соответствующего замкнутого отображения:

$$f: \vec{E}(t) \rightarrow \vec{u}(t). \quad (2)$$

Поэтому задачи измерения поляризационных параметров (поляриметрии) обычно решаются посредством измерения напряжений  $u(t)$  или токов  $i(t)$  в элементах антенных систем.

Проблеме поляриметрии посвящено достаточно большое число работ [3,4,5] и др. Методы поляриметрии сводятся к набору и обработке статистики.

Конкретные значения статистических параметров поляризационной структуры сигналов в линиях связи играют важную роль при использовании не только методов пространственно-временной обработки сигналов и помех, но и традиционных методов связи, при которых, как правило, применяются приемные и передающие антенны с фиксированными поляризационными параметрами. Это обусловлено тем, что различные изменения поляризации сигналов приводят к рассогласованиям в точке приема и так называемым поляризационным замираниям, к снижению энергии принятого сигнала, к появлению кросс-поляризационных компонентов и др. Кроме того, в реальных условиях, кроме наблюдаемых выборочных значений поля  $E(t)$  или  $u(t)$ , имеют место ошибки измерения  $\Delta u(t)$ , обусловленные погрешностью измерительных приборов. Ошибки появляются также в результате воздействия помех и шумов во входных элементах поляриметра. Во многих практических случаях эти погрешности удается аппроксимировать гауссовским законом и считать их результатом воздействия эквивалентного белого или окрашенного шума.

В настоящее время можно считать достаточно хорошо разработанными методы поляриметрии регулярных и случайных однородных по различным параметрам, полностью поляризованных полей. Поляриметрия неоднородных полей, нестационарных по различным физическим параметрам, значительно сложнее и требует использования принципиально новых методов и допущений, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить ее в реальном масштабе времени.

Оценивание поляризационных параметров имеет самостоятельное значение и это оценивание необходимо при решении различных задач связи, например, при установлении и поддержании связи с корреспондентом, поляризация которого неизвестна в силу произвольной ориентации его антенны, подвижности носителя источника сигнала либо в силу случайной анизотропии самого канала распространения, при изучении свойств и параметров источников сигналов, при исследовании сред распространения, при юстировке антенных систем.

Важную роль играет оценивание поляризационных параметров как составляющая, предварительная операция при решении более общих задач: поляризационного подавления или режекция сосредоточенных помех. В этом случае оценивают поляризационные параметры перед ортогонализацией базиса антенны по отношению к поляризации

действующей помехи, при восстановлении ортогональности принимаемых сигналов в системах связи с повторным использованием частот (ПИЧ) и других.

Таким образом, в общем случае  $\vec{E}(t)$  представляет собой векторный случайный процесс или случайное поле, развивающееся в пространстве и во времени. При неизменном направлении прихода такого поля в точку приема пространственное положение его вектора может быть полностью описано лишь в трехмерной системе координат, а само отображение (2) должно обеспечиваться с помощью трехэлементной, например, трипольной турникетной антенны. Это требование удовлетворяет теореме Гуревича об устойчивости отображений (2), что выполняется при условии соотношения размерности отображения в виде:

$$\dim E \leq \dim u. \quad (3)$$

В некоторых случаях, в частности, при известном направлении прихода волны обладающей плоским фазовым фронтом, размерность представления вектора  $\vec{E}(t)$  соответствует двум. В качестве примера на рис.2 показаны две ортогонально поляризованных волны эллиптической поляризации  $\vec{E}^T(t) = \{E_\xi(t), E_\eta(t)\}$  (T – операция транспонирования), векторы напряженностей которых совпадают с осями, образующими базис в виде эллипсов с противоположными направлениями вращения, равными эксцентриситетами и взаимно перпендикулярными большими осями.

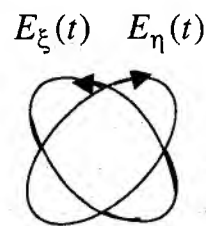


Рис. 2

В реальной обстановке статистические характеристики ЭМП зачастую неизвестны, а наблюдения, используемые для получения соответствующих статистик, являются условными, зависящими от выбранного поляризационного базиса  $\{\xi, \eta\}$  и подвержены влиянию помех. Полученные при этом оценки параметров поляризации, как и сама статистика процессов  $u_\xi(t)$ ,  $u_\eta(t)$ , уже должны определяться относительно условий наблюдения.

При получении выборочной статистики наблюдений  $\vec{E}^T_{iN} = \{E^i_\xi, E^i_\eta\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  ( $N$  - число отсчетных значений) желательно отдельные значения этой статистики  $E^i$  иметь независимыми. Независимость отсчетов может быть достигнута, например, разложением компонентов  $E_\xi(t)$ ,  $E_\eta(t)$  в ряд по системе ортогональных функций.

### Оценка элементов матрицы когерентности

Для ограниченного числа независимых отсчетов ( $N < \infty$ )

$$\begin{cases} E_\xi = E^1_\xi, E^2_\xi, \dots, E^N_\xi, \\ E_\eta = E^1_\eta, E^2_\eta, \dots, E^N_\eta, \end{cases} \quad (4)$$

максимально правдоподобной оценкой матрицы когерентности

$$J = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma^2_i & \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} \\ \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} & \sigma^2_j \end{pmatrix} \quad (5)$$

является выборочная ковариационная матрица [6]:

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N [E_i - \langle E \rangle][E_j - \langle E \rangle]^T, \quad (6)$$

где  $\langle E \rangle$  - среднее значение;  $\rho_{ij}$  - комплексный коэффициент корреляции;  $\sigma_i^2$  - дисперсия по  $i$ -му каналу.

Поскольку матрица когерентности (5), и, соответственно, и (6), комплексны, то для решения задачи в пространстве вещественных переменных число координат выборочного вектора (4) необходимо удвоить, т.е. перейти к вещественному четырехмерному вектору  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ . Тогда для рассматриваемых каналов типа рэлеевских, райсовских, матрица когерентности

$$J = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & d\sigma_1\sigma_2 & q\sigma_1\sigma_2 \\ 0 & \sigma_1^2 & -q\sigma_1\sigma_2 & d\sigma_1\sigma_2 \\ d\sigma_1\sigma_2 & -q\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & 0 \\ q\sigma_1\sigma_2 & d\sigma_1\sigma_2 & 0 & \sigma_2^2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $d$  и  $q$  - коэффициенты корреляции между одноименными и разноименными квадратурными составляющими волны ( $d, q = \frac{a_{ij}}{\sqrt{a_{ii}a_{jj}}}$ ,  $i, j = 1, 2, 3, 4$ ,  $i \neq j$ );  $a$  - элементы выборочной ковариационной матрицы (4x4), являющиеся составляющими модуля комплексного коэффициента корреляции:

$$|\rho| = \sqrt{d^2 + q^2} \quad (8)$$

Известно [6], что положительная матрица  $A = (N-1)S$  распределена по закону Уишарта:

$$w(A) = \frac{|A|^{\frac{1}{2}(N-r-2)} \exp\left(-\frac{1}{2} S_p^{-1} A\right)}{2^{\frac{N-1}{2}} \pi^{\frac{r(r-1)}{4}} |J|^{\frac{N-1}{2}} \prod_{i=1}^r \Gamma\left(\frac{1}{2}(N-r)\right)}, \quad (9)$$

где  $r$  - ранг матрицы;  $\Gamma(\cdot)$  - гамма-функция;  $S_p$  - след матрицы  $S$ .

Интегрированием по соответствующим параметрам вычисляются конечные выражения для матрицы когерентности, которые могут быть использованы в адаптивных алгоритмах поляриметрии.

При ПИЧ возникает проблема влияния переходных, из  $i$  в  $j$  каналах и обратно, помех, вызванных деполяризацией в тракте распространения радиоволн. Наиболее существенные поляризационные искажения наблюдаются в дециметровом и нижней части сантиметрового диапазонов, где проявляется эффект Фарадея [2] и где сосредоточены диапазоны частот основных систем подвижной связи. На поляризационную структуру сигналов в системах ПИЧ влияют также гидрометеоры в жидкой и твердой фазах [2], рассеивающее падающее поле. Кроме того, поляризационные искажения наступают в тех условиях, когда прием сигналов осуществляется на скате главного лепестка диаграммы направленности антенны.

Все эти три главные причины в разной степени влияют на качество приема полезных сигналов, и качество этого приема однозначно зависит от степени поляризации. Известно [2], что степень поляризации  $m$  численно равна максимуму комплексного коэффициента корреляции  $\rho_{ij}$ . Максимально правдоподобной оценкой  $\rho_{ij}$  является оценка Пирсона:

$$\hat{\rho}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N [E_i - \langle E \rangle][E_j - \langle E \rangle]^T}{\sqrt{[E_i - \langle E \rangle]^2} \sqrt{[E_j - \langle E \rangle]^2}}. \quad (10)$$

Распределение вероятностей  $w(\hat{\rho})$  получим из закона распределения Уишарта, интегрируя (9) по выборочным дисперсиям, и переходя к новым переменным, определяемым выражением (8), получим:

$$w(\hat{\rho}_{ij}) = \frac{\Gamma(0,5(N-1))}{\Gamma(0,5(N-2))\sqrt{\pi}} (1-\hat{\rho}^2)^{\frac{N-4}{2}}. \quad (11)$$

На рис. 3 представлены графики плотности распределения оценки  $w(\hat{\rho}_{ij})$  для  $\rho = 0,2$ .

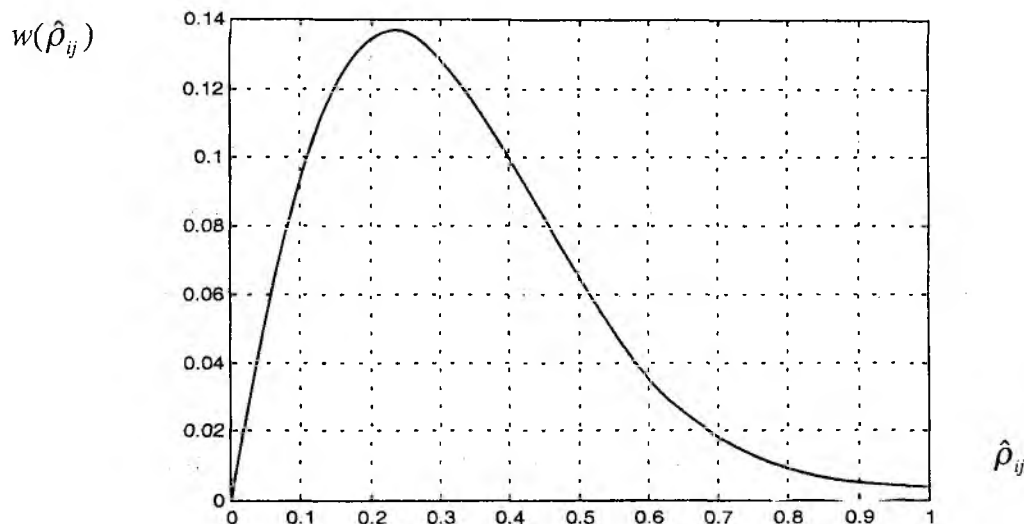


Рис.3

Таким образом, поляриметрия сигналов спутниковых систем связи обеспечивают контроль качества передачи информации.

**Список литературы:** 1. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи. Эко-трендз. М.: 1999. 195 с. 2. Родимов А.П., Поповский В.В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех. М.: Радио и связь. 1984. 272 с. 3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 740 с. 4. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966. 440 с. 5. Канарейкин Д.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф. Морская поляриметрия. Л.: Судостроение, 1968. 328 с. 6. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 760 с.

Харьковский национальный  
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 23.04.2002