УДК 621.396.9

В. В. ПОПОВСКИЙ, д-р. техн. наук, С. В. ГАРКУША

АКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО РЕСУРСА В ЗАДАЧАХ РАДИОДОСТУПА

Традиционными методами радиодоступа в системах сотовой, радиорелейной, спутниковой связи, в системах Wi-Fi, Wi-Max являются:

1. Частотный доступ (frequency division – FD). Пользователям выделяются определенные участки в полосе частот.

2. Временной доступ (time division – TD). Пользователям выделяются соответствующие периодические или случайные временные интервалы.

3. Кодовый доступ (code division – CD). Пользователям выделяются определенные элементы из набора ортогональных (или почти ортогональных) кодовых комбинаций, которые совместимо занимают всю выделенную полосу частот. В этом случае каждый абонент передает свои сигналы с особенным кодом одновременно в общей полосе частот, а их разделение происходит по форме и содержанию кода.

Наряду с этими, все большую популярность приобретают:

1. Пространственный доступ (space division – SD), или повторное пространственное использование частот. Доступ реализуется с помощью многолучевых антенн (МЛА), которые излучают радиосигналы лишь в направлении определенного пользователя, который подал заявку.

2. Поляризационный доступ (polarization division – PD), или повторное поляризационное использование частот. Для разделения сигналов применяются ортогональные поляризации на передаче и на приеме радиосигналов.

Следует заметить, что в задачах доступа пространственно-поляризационные параметры лишь за последнее время стали приобретать популярность в связи с дефицитом частотного ресурса. Сложность их активного использования в этих задачах была связана с необходимостью разработки соответствующих специфических конструкций антенн и соответственно увеличения габаритных размеров приемо-передаточных устройств. Однако технологии создания антенных решеток с использованием эффективных адаптивных алгоритмов обработки векторных пространственно-поляризационных сигналов приобретают особое значение.

При использовании SD и PD удается решить ряд практически важных задач, среди которых: множественность доступа, что в литературе называют MIMO (многие входы – многие выходы), повторное использование частот, повышения энергетики радиолинии, обеспечение высокой помехозащищенности и другое.

Метод пространственно-временного доступа

Известный достаточно простой алгоритм функционирования точки доступа или базовой станции с пространственно-временным доступом. Процедура предоставления ресурса станции состоит из четырех основных этапов:

1. Прием заявки от абонента. Эта заявка принимается ненаправленной или слабо направленной антенной. Одновременно определяется направление прихода сигнала заявки.

2. В направлении абонента, который посылает вызов, устанавливается узкий луч МЛА.

3. Проводится поиск вызываемого абонента в пределах действия роуминга ненаправленными антеннами базовых станций. После ответа этого абонента в его направлении также устанавливается узкий луч МЛА этой или другой базовой станции.

4. Обеспечивается связь между абонентами, а в конце сеанса установленные лучи убираются или переориентируются на других абонентов.

Чаще всего апертура МЛА выполняется в виде дискретных антенных элементов, каждый из которых имеет свою функцию излучения, $\psi_i(u)$, $u = \pi d \sin\theta / \lambda$. Такая дискретная антенна носит название антенной решетки (АР) [1,2,3].

Результирующая диаграмма направленности (ДН) АР, которая образована МЛА, представляется в виде

$$G(u) = \sum_{i=1}^{N} w_i \psi_i(u), \tag{1}$$

где w_i – комплексный весовой коэффициент, обеспечивающий управление амплитудой и фазой.

Управление лучами такой МЛА осуществляется за счет изменения параметров взвешивающих (весовых) коэффициентов, которые включены в цепь каждого антенного элемента АР.

Рассмотренный механизм создания необходимой ДН (1) достаточно универсальный в том смысле, что по такой схеме выполняются практически все пространственно-поляризационные задачи в АР: создание МЛА, разнесенный прием, адаптивный прием, адаптивная компенсация помех (АКП), робота адаптивных антенных решеток (ААР), фазируемых АР (ФАР), множественный доступ, все эти и другие задачи, которые объединяются под брендом MIMO. Пример электрической схемы таких антенных решеток представлен на рис. 1.

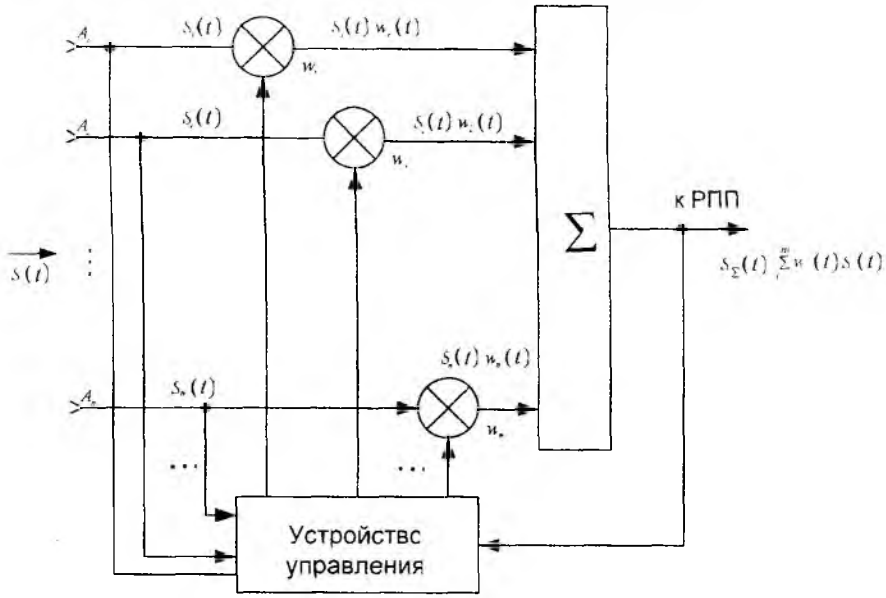

Рис. 1

Поляризация в задачах доступа

Особое значение имеют задачи доступа с использованием поляризационных параметров сигналов и антенн. Поляризация определяется той мнимой фигурой, которую рисует конец вектора напряженности электрического поля сигнала, что излучается соответствующей антенной на плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Так, линейная антенна, штыревого типа излучает линейную поляризацию (горизонтальную, вертикальную или с наклоном). Можно с помощью более сложных антенн создать круговую или эллиптическую поляризацию [2].

Антенна может быть согласована с сигналом по поляризации и тогда выделяется максимальный принятый сигнал (согласован по поляризации прием сигналов), который характеризуется уровнем $П$ в точке приема. Другой крайний случай: сигнал может оказаться ортогональным по отношению к поляризации антенны (например, антенна горизонтально поляризованная, а сигнал имеет вертикальную линейную поляризацию).

В общем случае между поляризацией антенны и сигнала образуется некоторый угол $\gamma = 2\gamma_П$. При этом мощность принятого сигнала $P_{пр} = П \cdot S_{еф}$, на выходе антенны с эффек-

тивной площадью $S_{еф}$ зависит как от указанного угла $\gamma_П$, так и от степени поляризации этого сигнала $m_П$ [2]:

$$P_{пр\ вих} = 0.5P_{пр}\left(1 - m_П\right) + m_П P_{пр} \cos^2 \frac{\gamma_П}{2}.$$

Из данной формулы выходит, что при неполяризованном, или же хаотически поляризованном сигнале, когда $m_П = 0$, на выходе антенны уровень этого сигнала $P_{пр\ вих} = 0.5P_{пр}$ и этот уровень не зависит от вида поляризации антенны. Другими словами: при какой-нибудь антенне можно принять только половину уровня неполяризованного сигнала. В другом крайнем случае, когда сигнал полностью поляризован, при $m_П = 1$, можно выбрать поляризацию антенны так, что на ее выходе будет выделена вся мощность сигнала (при $\cos^2 \frac{\gamma_П}{2} = 1$ когда $\gamma_П = 0$). То есть, при $\gamma_П = 0$ имеем согласованный по поляризации прием. При этом максимизуется функция

$$\sum_{i=1}^{N} w_i \psi_i(n) \underset{w_i}{\rightarrow} \max,\ N = 2. \qquad (2)$$

В данном случае $N = 2$ означает, что для создания любой или изменяемой поляризации необходимо по крайней мере 2 антенных элемента.

Очевидно при других значениях w_i существуют условия, когда функция (1) принимает также и нулевое значение:

$$\sum_{i=1}^{N} w_i \psi_i(n) \underset{w_i}{\rightarrow} 0,\ N = 2. \qquad (3)$$

Данное условие (3) характеризует наличие «нулевых» поляризаций, ортогональных по отношению к сигналам. Такая ортогонализация используется при подавлении помех, при их поляризационной режекции, при рассмотрении сигналов с ортогональными поляризациями.

Кроме задач поляризационного согласования с полезным сигналом и поляризационной режекцией помех, поляризация используется и при решении других важных задач, к числу которых следует отнести [2]:

- повторное использование частот, когда на двух ортогональных поляризациях передаются независимые информационные потоки, что позволяет вдвое увеличить производительность элемента доступа;
- поляризационную модуляцию и демодуляцию сигналов, когда, например, "1" передается вертикальной поляризацией, а "0" – горизонтальной. Такое решение весьма конструктивно, поскольку процесс модуляции осуществляется не в радиотракте передачи, а непосредственно в антенне;
- прием при разносе по поляризации. Такая задача особенно эффективна в многолучевых радиоканалах типа каналов сотовой, транкинговой связи. При этом реализовать данный разнесенный прием можно и в абонентской станции, потому что за счет компактности двух ортогонально поляризуемых антенн, размещенных в одном электрическом центре, можно сберечь существующие габариты самой мобильной абонентской станции;
- адаптивный по поляризации прием, когда имеющиеся поляризационные изменения параметров сигналов или помех соответственно отслеживаются поляризацией приемной станции.

Адаптация в задачах доступа

Адаптацию можно определить, как процесс оптимизации соответствующего алгоритма к переменным и случайным во времени внешних влияниях. Относительно задач доступа такими внешними влияниями являются:

- помеховые действия со стороны других радиоэлектронных систем, источников искусственного или естественного происхождения;

- влияния со стороны среды распространения радиосигналов, что приводят к случайным изменениям параметров принятых сигналов, к их замираниям;

- случайность и нестационарность трафика, что требует соответствующего реагирования со стороны технологии управления на уровне доступа с целью обеспечения необходимого уровня обслуживания LMS.

Подавление помех. Адаптивные антенные решетки

Процесс подавления помех на приемной стороне с помощью адаптивных антенных решеток (ААР) заключается в том, чтобы в направлениях прихода этих помех $S^{(П)}$ образовать «нули» ДН, чтобы выполнялось условие [1]:

$$\sum_{i=1}^{N} w_i(t)\dot{S}_i^{(П)}(t) \xrightarrow[w_i]{} 0,\ N = 1,\ 2,\ ...,\ N, \tag{4}$$

где $\dot{S}_i^{(П)}(t)$ – помеховые сигналы, принятые антенными элементами. Предусматривается, что входит в принятую антеннами реализацию аддитивно:

$$\vec{y}(t) = \vec{S}^{(К)}(t) + \vec{S}^{(З)}(t) + \vec{S}^{(ш)}(t),$$

где индексы "С", "П" и "Ш" относятся в соответствии к полезным информационным сигналам, сигналам помехи и шуму.

Решение этой задачи достигается при соответствующем управлении векторами весовых коэффициентов (ВВК): $\vec{w}(t) = (w_1(t), ... w_N(t))^{\mathrm{T}}$.

Устройство управления ВВК, где эта адаптивная процедура реализуется, является оптимальным алгоритмом оценки этого ВВК. Исторически первым, достаточно простым, является алгоритм Уидроу:

$$\frac{d\,\vec{w}(t)}{dt} = \mu\left[\dot{\vec{y}}(t)d\,\vec{w}(t) - \dot{y}_э(t)\right]\dot{\vec{y}}(t), \tag{5}$$

где $\dot{y}_э(t)$ – некоторый эталонный сигнал, желаемый для приема, идентичный по структуре с полезным сигналом; $\mu \le 1$ – коэффициент сходимости данной градиентной процедуры; $\vec{w}(t)$ – оценка ВВК, оптимальная по критерию минимума среднего квадрата разницы принятого сигнала $\vec{S}^{(C)}(t)$ от эталона $\dot{\vec{y}}_э(t)$.

Алгоритм на практике реализуется в дискретном виде:

$$\vec{w}(k+1) = \vec{w}(k) + \mu(k+1)\left[\dot{\vec{y}}(k)\,\vec{w}(k) - \dot{y}_э(k)\right]\dot{\vec{y}}(k),$$

где μ и $y_э$ – те же, что и в (5).

Исследования показывают, что уровень подавления помех может достигать 20...30 *дБ* и больше. Этого часто вполне достаточно для обеспечения устойчивой связи у радиолинии, направленной к точке доступа, базовой станции или радиорелейной линии.

Другим адаптивным алгоритмом назначения для подавления помех, также предложенным Уидроу, есть адаптивный компенсатор помех (АКП). Для его реализации необходимо создать опорный канал приема, свободный от полезного информационного сигнала, когда $\vec{S}^{(C)}(t) \to 0$:

$$y_{оп}(t) = \vec{S}^{(С)}(t) + \vec{S}^{(Ш)}(t).$$

Более общими являются адаптивные алгоритмы ААР и АКП, синтезированные с использованием методов переменных состояния на базе процедур Калмана-Бьюси, или с использованием марковской теории нелинейной фильтрации [2].

Борьба с многолучевостью в радиолиниях доступа

В радиолиниях доступа сотовой, транкинговой, пейджинговой связи, в технологиях Wi-Fi, Wi-Max за счет перемещения объектов связи, движений окружающих предметов, людей возникают быстрые замирания сигналов, вызванные многолучевостью, повторным отражением от подвижных предметов. Опыт показывает, что статистическая структура таких замирающих сигналов разная в разных точках пространства, а их поляризация – случайно изменяется. Этот факт может быть использован для повышения надежности связи. Он дает возможность рекомендовать методы разнесенного приема по пространству и (или) по поляризации.

Из теории связи известно, что разнесенный прием тем более эффективный, чем более независимыми будут сигналы в разнесенных каналах [4].

Таким образом, возникаю три важные задачи.

Первая задача: получение нескольких (двух или более) независимых реализаций принятого сигнала. Для этого могут быть использованы два сигнала, которые приняты ортогонально поляризованными антеннами, два или более сигналов, принятых антеннами в разных точках пространства, разнесенных на расстояние $d \geq (10...100)\lambda$, сигналы, разнесенные по частоте на интервал $\Delta f \geq 1...1,5$ *МГц*. Метод разноса по углу прихода сигнала лишь упоминается в литературе, он нигде реализован не был. Разнос по времени реализуется в виде использования широкополосных сигналов (ШПС) за счет прямого расширения спектра DSSS либо псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), либо FHSS.

Вторая задача: сложение разнесенных сигналов. Она может быть решена либо с учетом (при синфазном сложении), либо без учета фазы несущей частоты (т.н. додетекторное и последетекторное сложение). Синфазное (додетекторное) сложение более эффективно. Так, при сложении двух сигналов с напряжением U_1 и U_2, что различаются по фазе на угол φ получаем суммарную мощность:

$$P_\Sigma \approx (U_1 + U_2)^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos\varphi .$$

Очевидно, при синфазном сложении, когда $\cos\varphi = 0$, получаем $P_\Sigma \approx P_1 + P_2 + 2P_1 = 4P_0$. Если же фазу не учитывать, то третье слагаемое необходимо отбросить и $P_\Sigma \approx 2P$.

Несмотря на потерю мощности в 2 раза последетекторное сложение (без учета фазы) используют там, где необходимо максимально упростить схемные решения. Синфазное же сложение требует дополнительных схемотехнических решений и синхронизации высокочастотных слагаемых сигналов.

Третья задача: определение весовых коэффициентов слагаемых сигналов, потому что от этого в значительной степени зависит отношение сигнал/шум результирующего сигнала S_Σ. Так, можно сложить все сигналы с одним и тем же весом, например $w_i = 1$ для всех ветвей разноса (т.н. линейное сложение). В этом случае те ветви, где сигнал мал, дадут вклад лишь в рост уровня шума. Другое решение: можно каждый момент времени выбирать лишь одну ветвь, где полезный сигнал максимален (т.н. автовыбор), но при этом будут отброшены ветви, где сигналы несколько меньше, и они могли бы дать положительный вклад в общий итог.

Можно показать, что наилучшим, оптимальным, будет сложение с весом, пропорциональным уровню полезного сигнала в каждом i-канале (т.н. квадратичное сложение). В этом случае исходный сигнал S_Σ представляется в виде

$$S_\Sigma = \sum_{i=1}^{N} w_i \dot{\psi}_i(n) = \sum_{i=1}^{N} w_i \dot{S}_i(t) = \sum_{i=1}^{N} S_i^{(C)}(t) \dot{S}_i(t), \qquad (6)$$

где $w_i = \dot{S}_i^{(C)}(t)$.

Эффективность приема разнесенных сигналов зависит от числа ветвей разнесения (с увеличением их количества – качество приема растет). Эффективность растет также оттого, насколько независимые сигналы в этих ветвях разнесения.

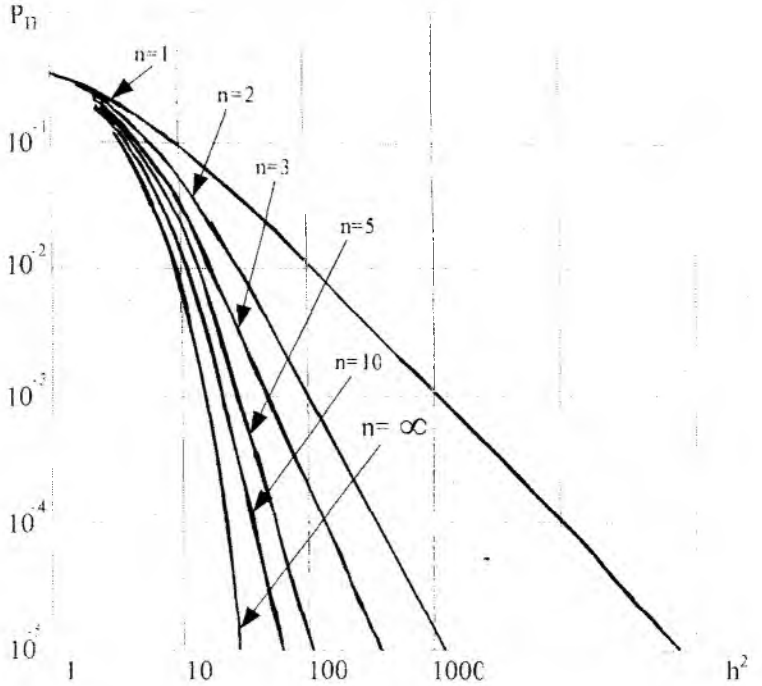

Рис. 2

Наибольший вклад приносит переход от одиночного $(n=1)$ к $(n=2)$ двукратному приему, все последующие добавки количества ветвей разноса также добавляют качества приему, но все меньший (рис. 2).

Прием некоррелированных ($r=0$) разнесенных сигналов, дает заметный выигрыш, по отношению к коррелированным ($r=1$). Даже в каналах с достаточно высокой корреляцией – этот выигрыш все же есть. Таким образом, разнесенный прием имеет смысл использовать даже в тех случаях, когда между разнесенными каналами имеется значительная корреляция.

За последние годы все больше фирм, которые заняты изготовлением телекоммуникационного оборудования, ученых, специалистов обращают внимание на необходимость использования пространственно-поляризационных ресурсов для обеспечения высокого качества решения задач доступа в разных технологиях, которые согласованы с концепцией создания фиксированно-мобильных систем (FMS).

Список литературы: 1. *Проблемы* антенной техники. / Под ред. Л.Д.Бахраха и Д.И.Воскресенского. М.: Радио и связь, 1990. 680 с. 2. *Родимов А.П., Поповский В.В.* Статическая теория поляризационно-временной обработки сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 278 с. 3. *Минкович Б.Н., Яковлев В.П.* Теория синтеза антенн. М.: Сов.радио, 1969. 296 с. 4. *Багатоканальний* електрозв'язок та телекомунікаційні технології / За ред. В.В. Поповського. Х.: СМІТ, 2003. 512 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 07.11.2007