

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ И УСТОЙЧИВОСТЬ К НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГВЗ СИСТЕМЫ СВЯЗИ McWiLL

*О.А. Шорин, Генеральный директор ООО «НСТТ», профессор, д.т.н., oshorin@gmail.com;
Р.С. Аверьянов, директор по производственной деятельности ООО «НСТТ».*

УДК 621.396

Аннотация. Рассмотрен вопрос устойчивости системы связи *McWiLL* к показателю неравномерности группового времени запаздывания (ГВЗ). Проведен анализ этапов организации связи, применяемых в *McWiLL*, на подверженность деградации в условиях роста неравномерности ГВЗ. Установлено, что наиболее уязвимым является режим поиска и входа в синхронизацию с сигналом «Преамбула» (*Preamble*), так как на этом этапе не производится настройка характеристик канала связи. Установлена высокая устойчивость системы широкополосной подвижной связи *McWiLL* по отношению к неравномерности ГВЗ радиотракта.

Ключевые слова: групповое время запаздывания; абонентская станция; синхронизация; ФЧХ; неравномерность.

ALGORITHMIC FEATURES OF THE ORGANIZATION OF COMMUNICATION AND SUSTAINABILITY TO THE UNEVENMIALITY OF THE GROUP LAG TIME OF THE McWiLL COMMUNICATION SYSTEM

*Oleg Shorin, General director of LLC «NXTT», professor, doctor of technical sciences;
Roman Averyanov, production director of LLC «NXTT».*

Annotation. The question of stability of *McWiLL* communication system to the indicator of unevenness of group lag time is considered. The analysis of the stages of communication organization used in *McWiLL* on the susceptibility of degradation in the conditions of growth of the unevenness of group lag time is held. It has been established that the search and synchronization mode with the “Preamble” signal is the most vulnerable since at this stage the characteristics of the communication channel are not adjusted. The high stability of the *McWiLL* broadband mobile communication system with respect to the non-uniformity of the group lag time radio path has been established.

Keywords: group lag time; subscriber station; synchronization; phase-Frequency Characteristic, unevenness.

Неравномерность группового времени запаздывания (ГВЗ) в радиотракте возникает по ряду технологических причин, и, как правило, чем выше требуются частотно-селективные показатели, тем более высокий уровень приобретает неравномерность ГВЗ. Поэтому важно знать какие предельные показатели по неравномерности ГВЗ допустимы. Система мобильной связи *McWiLL* относится к поколению 4G. Ее характеризует высокая степень организационной сложности и иерархическая структура взаимодействующих логических уровней. Борьба с негативными последствиями таких показателей как неравномерность АЧХ и нелинейность ФЧХ (однозначно связана с неравномерностью ГВЗ) происходит разными способами на разных этапах. Поэтому исследование устойчивости системы к показателю неравномерности ГВЗ является комплексным вопросом, требующим детализированного описания режима организации связи.

Этапы организации связи в *McWiLL*, на которые оказывает негативное влияние неравномерность ГВЗ, следующие:

- Поиск абонентской станцией (АС) сигнала *Preamble*, транслируемого в широкополосном режиме базовой станцией (БС), обслуживающей территорию.

- Предварительная настройка задержки трансляции АС, осуществляемая с помощью сигнала *Ranging*.
 - Прием информационных сообщений, сопровождающийся корректирующим выравниванием АЧХ и ФЧХ радиотракта на основе встроенных *Pilot*-сигналов.
 - Управление задержкой трансляции АС со стороны обслуживающей БС.
- На рис. 1 показана блок-схема начала режима организации связи в системе *McWiLL*.

Как можно видеть, самыми критичным относительно неравномерности ГВЗ (и АЧХ/ФЧХ) является этап поиска сигнала *Preamble*, так как он не предусматривает коррекции неравномерности характеристик. На всех остальных этапах применяются референсные сигналы *Pilot* (врезки в ресурсные блоки), имеющие известную амплитудно-фазовую структуру, связанную с номерами подканала и индексом обслуживающей БС [1]. По ним осуществляется выравнивание характеристик, которые могут изменяться динамически, и проблема теряет актуальность. Поэтому устойчивость к показателям неравномерности ГВЗ (и АЧХ/ФЧХ) радиотракта системы *McWiLL* следует рассматривать именно в рамках этапа поиска и обнаружения сигнала *Preamble*.

В режиме поиска сигнала *Preamble* абонентская станция осуществляет сканирование позиций несущей частоты в пределах диапазона 8 МГц и позиций задержки в пределах диапазона длительности кадра *McWiLL* (10 мс [1]). Шаг перебора частот составляет 250 кГц, что соответствует дискретности установки, несущей в *McWiLL*. Шаг по задержке составляет 80 мкс, что обеспечивает полное попадание интервала обработки БПФ64 хоть для одной точки прохода в интервал присутствия сигнала *Preamble*, состоящего из 2-х одинаковых фрагментов длительностью 64 мкс каждый. Для пояснения процесс попадания точки контроля в указанный интервал показан на рис. 2.

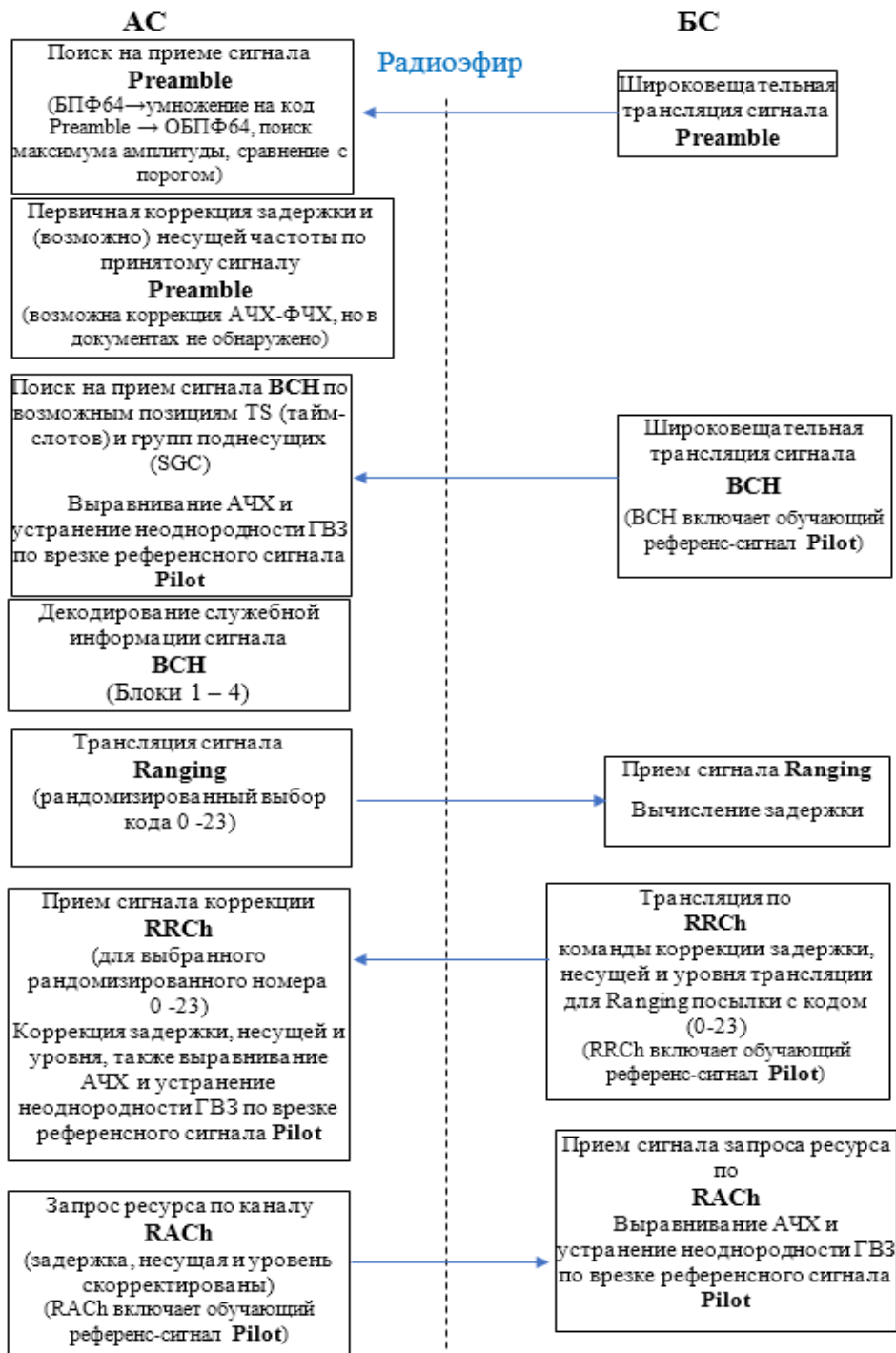


Рисунок 1

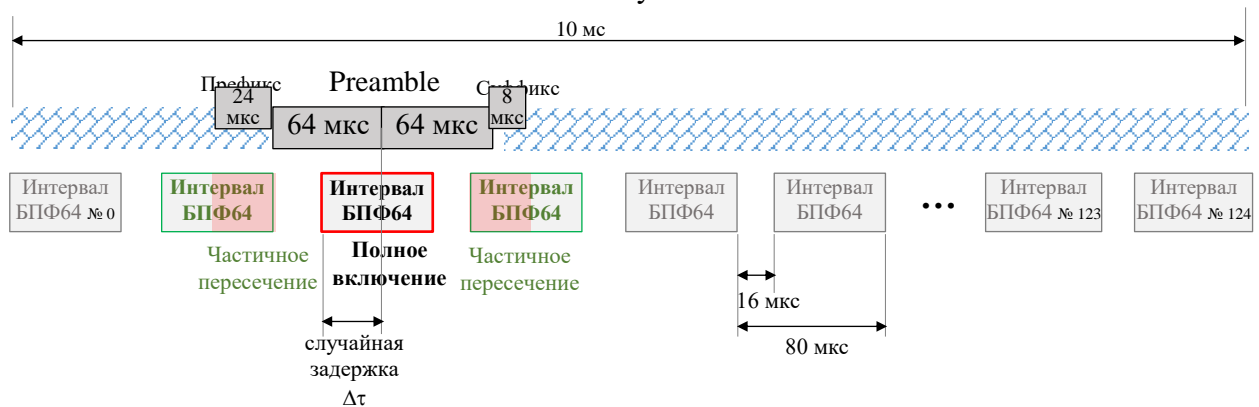


Рисунок 2

Поиск несущей частоты более простой для анализа процесс по сравнению со сканированием задержки. Объясняет это относительно высокая точность предустановки возможных позиций несущей. Действительно, искажения БПФ преобразования можно считать небольшими, если позиции сетки частот отклоняются на величину меньшую $\frac{1}{4}$ от шага разноса соседних составляющих. В сигнале *Preamble* используется сетка из 64 поднесущих равномерно распределенных в пределах полосы 1 МГц. Поэтому допустимыми будут ошибки установки несущей частоты в пределах:

$$|\delta f| \leq (1/4) \cdot \frac{1}{64} \text{ МГц} = 3,906 \text{ кГц}.$$

Для диапазона 340 МГц это приводит к требованиям долгосрочной стабильности опорного генератора АС на уровне:

$$\frac{3,906 \text{ кГц}}{340 \text{ МГц}} \approx 1.15 \cdot 10^{-5} = 11,5 \text{ ppm}.$$

Что является очень невысоким уровнем. Даже для диапазона 1800 МГц требования на стабильность составляют 2,17 ppm, что не представляет никакой трудности реализации.

А случайная задержка предустановки начала сигнала *Preamble* может оказаться в пределах от 0 до 64 мкс. Более того, возможна неоднозначность по привязкам к началу или к центру реального сигнала. Поэтому необходима дополнительная проверка для сдвигов -64 мкс и 0 мкс относительно первично обнаруженной позиции «начала» сигнала *Preamble*.

Первичная оценка «начала» сигнала *Preamble* выносится оп дискретной точке на оси времени, в которой наблюдается максимум отклика (превосходящего порог обнаружителя) на выходе блока ОБПФ64.

Приведем краткую аналитическую справку организации поиска сигнала *Preamble*, необходимую для анализа устойчивости.

В указанном режиме в последовательно проверяемых позициях сдвига времени и несущей частоты осуществляются БПФ преобразование принятого сигнала на интервале 64 точек с дискретом 1 мкс. Пусть присутствующий сигнал *Preamble* имеет задержку $\Delta\tau$ относительно начала интервала обработки (см. рис. 2). Тогда спектральные компоненты, формируемые на выходе блока БПФ64 (обнаружителя *Preamble*) будут:

$$\dot{P}_r(i) = \{A + \delta A(i)\} e^{-j2\pi i(\Delta f \Delta\tau)} \cdot e^{j \cdot \delta\varphi(i) + \delta\varphi_0} \cdot X_p(i), \quad i = 0, 1, \dots, 63, \quad (1)$$

где: A – среднее значение амплитуды спектра *Preamble* на приеме, $\delta A(i)$, $\delta\varphi(i)$ – случайные составляющие амплитуды и фазы *Preamble* в позиции поднесущей i , обусловленные неравномерностью АЧХ и ФЧХ, $\Delta f = 1 \text{ МГц} / 64 = 15,625 \text{ кГц}$ – частотный разнос дискретных спектральных составляющих *Preamble*, $\delta\varphi_0$ – случайная начальная фаза, $X_p(i)$ – символы (± 1), задающие код сигнала *Preamble*, однозначно связанный с индексом БС ID (0-15) транслирующей сигнал станции.

АС, осуществляет поиск сигнала *Preamble* для всех возможных значений БС ID . Поэтому она осуществляет умножение сформированных спектральных компонент (1) на каждую из 16 допустимых последовательностей $X_p(i)$. Для каждого результата формирует преобразование ОБПФ64. При правильном выборе последовательности $X_p(i)$ на входе ОБПФ64 будет дискретный спектр без $X_p(i)$ множителей:

$$\dot{W}(i) = X_p(i) \cdot \dot{P}_r(i) = \{A + \delta A(i)\} e^{-j2\pi i(\Delta f \Delta \tau)} \cdot e^{j \cdot \delta \varphi(i)}, \quad i = 0, 1, \dots, 63.$$

В идеальном случае отсутствия искажений АЧХ и ФЧХ получим:

$$\dot{W}_u(i) = A e^{-j2\pi i(\Delta f \Delta \tau)}, \quad i = 0, 1, \dots, 63.$$

При этом преобразование в блоке ОБПФ64 можно записать так:

$$\dot{S}(k) = \text{IFFT}[\dot{W}_u(i)] = \frac{A}{64} \sum_{i=0}^{63} e^{j2\pi i[k\Delta t - \Delta \tau]\Delta f}, \quad k = 0, 1, \dots, 63, \quad (2)$$

где: k – номер дискретной временной позиции на выходе блока ОБПФ64, $\Delta t = 1$ мкс – шаг между позициями отсчетов, формируемых на выходе блока ОБПФ64. При этом синфазная и ортогональная квадратурные компоненты отсчетов будут равны:

$$S_I(k) = \text{Re}(\dot{S}(k)), \quad S_Q(k) = \text{Im}(\dot{S}(k)), \quad k = 0, 1, \dots, 63.$$

Работа обнаружителя состоит в поиске отсчета k , обеспечивающего максимум:

$$D = \max_{k=0..63} (S_I^2(k) + S_Q^2(k)), \quad (3)$$

и сравнения этой величины с порогом:

$$D \begin{matrix} > & \text{II} \\ < & \text{H}_0 \end{matrix} \quad (4)$$

Алгоритм обнаружения (3)-(4) инвариантен к случайному постоянному сдвигу фазы $\delta \varphi_0$.

Формула (2) показывает, что максимальный отклик на выходе ОБПФ64 (и на входе решающего правила (4)) следует ожидать для позиции k_0 :

$$k_0 = \arg \left(\min_{k=0..63} |k\Delta t - \Delta \tau| \right). \quad (5)$$

Таким образом, техника ОБПФ64 в режиме поиска сигнала *Preamble* обеспечивает предварительную синхронизацию по задержке с точностью $\pm 1/2\Delta t = \pm 0,5$ мкс. В принципе существует возможность дальнейшего уточнения параметра задержки на основе интерполяционной формулы [2]:

$$\Delta \hat{\tau} = \left[k_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{(S_I^2(k_0+1) + S_Q^2(k_0+1)) - (S_I^2(k_0-1) + S_Q^2(k_0-1))}{2(S_I^2(k_0) + S_Q^2(k_0)) - (S_I^2(k_0+1) + S_Q^2(k_0+1)) - (S_I^2(k_0-1) + S_Q^2(k_0-1))} \right] \cdot \Delta t. \quad (6)$$

Но в документации данных об этом не обнаружено.

Наличие искажений характеристик АЧХ, ФЧХ и ГВЗ приводит к потере эффективности процедуры обнаружения (4). Простой анализ показывает, что линейная составляющая в ФЧХ (или постоянная составляющая ГВЗ) приведут к простой коррекции для оценки задержки, но не к энергетическим потерям. Реально к деградации характеристик обнаружителя будут приводить только нелинейные составляющие характеристики ФЧХ.

Воспользуемся мажоритарной оценкой. То есть будем полагать, что нелинейные составляющие ФЧХ, начиная со второго порядка ограничены сверху границей:

$$\left| \delta\varphi(i) - \{a_{\delta\varphi} + (i-31,5) \cdot b_{\delta\varphi}\} \right| \leq c_{\varphi} \cdot \left| (i-31,5)^2 - 341,25 \right|, \quad (7)$$

где в фигурных скобках в левой части записана оценка линейной регрессии для ФЧХ, коэффициенты $a_{\delta\varphi} = \frac{1}{64} \sum_{i=0}^{63} \delta\varphi(i)$ и $b_{\delta\varphi} = \frac{1}{21840} \sum_{i=0}^{63} (\delta\varphi(i) - a_{\delta\varphi}) \cdot (i-31,5)$ – коэффициенты линейной регрессии, c_{φ} – положительное значение, обеспечивающее условие (7) в диапазоне 1 МГц. Постоянную c_{φ} будем использовать как базовый показатель, устанавливающий допустимый уровень неравномерности ГВЗ (нелинейности ФЧХ) для диапазонов 1 МГц.

Путем элементарных вычислений на основе (7) находим неравномерность ГВЗ:

$$\Delta \text{ГВЗ} = \pm \frac{63 \cdot c_{\varphi}}{2\pi(1/64)} = \pm 641,71 \cdot c_{\varphi} \text{ [мкс]} \quad (8)$$

и соответствующие энергетические потери обнаружителя *Preamble*:

$$D = \left\{ \frac{A}{32} \sum_{m=0}^{31} \cos \left(c_{\varphi} \cdot \left((m+0,5)^2 - 341,25 \right) \right) \right\}^2. \quad (9)$$

На рис. 3 показана зависимость энергетических потерь (9) от показателя неравномерности ГВЗ (8). Видно, что, если принять допустимыми энергетические потери на уровне 0,25 дБ, то допустимой будет неравномерность ГВЗ в пределах 500 нс. Это доказывает высокую устойчивость системы *McWiLL* по отношению неравномерности ГВЗ в приемном тракте.

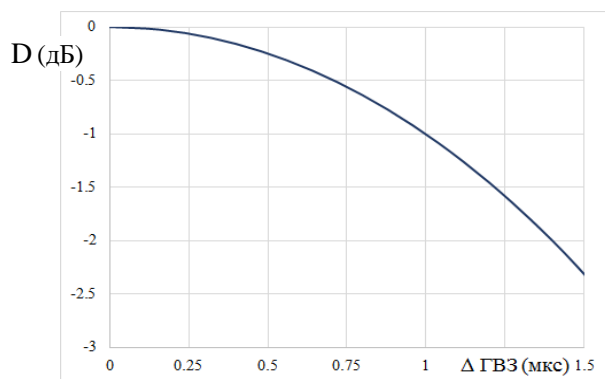


Рисунок 4

Аналогичный расчет для неравномерности АЧХ показан на рис. 5. По горизонтальной оси отложен уровень неравномерности АЧХ (по отклонению от средней величины) в дБ, а по вертикальной – относительный уровень помех на входе решающей схемы обнаружителя, возникающих из-за неравномерности АЧХ.

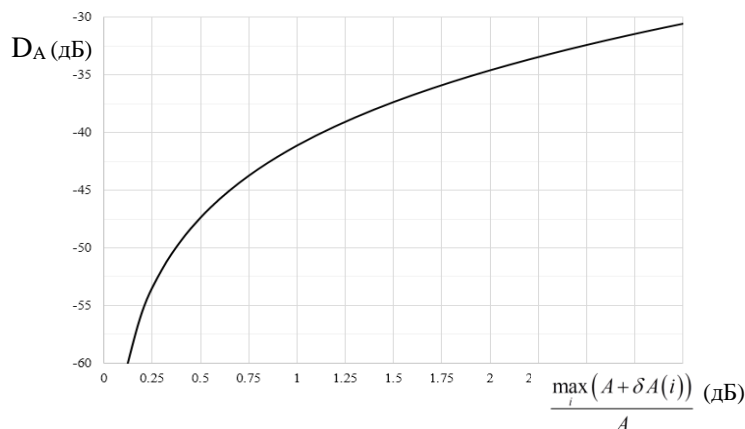


Рисунок 5

Если задаться допустимым уровнем помех -40 дБ, то получим допустимый уровень неравномерности АЧХ ± 1 дБ в пределах полосы 1 МГц.

Заключение. Система широкополосной подвижной радиосвязи *McWiLL* обладает высокой устойчивостью к неравномерности ГВЗ в радиотракте. В каждой полосе 1 МГц допускаются изменения в пределах ± 500 нс. Это подтверждает возможность решать задачи частотной избирательности с повышенной эффективностью.

Литература

1. ГОСТ Р 58166-2018. Технические требования к радиointерфейсу широкополосной подвижной радиосвязи (ШПР). Организация протоколов и алгоритмов работы на канальном и физическом уровнях. Основные параметры и технические требования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 142 с.
2. Горгадзе С.Ф., Бокк Г.О. Планирование и обработка результатов эксперимента в радиотехнике и инфокоммуникационных системах // – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 132 с.
3. Шорин О.А. Вероятность перегрузки сотовых систем связи с учетом подвижности абонентов // Электросвязь, 2004. – № 5.
4. Косинов М.И., Шорин О.А. Повышение емкости сотовой системы связи при использовании зон перекрытия // Электросвязь, 2003. – № 3.
5. Лохвицкий М.С., Сорокин А.С., Шорин О.А. Мобильная связь: стандарты, структуры, алгоритмы, планирование Москва, 2018.