DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-1-97-104
УДК 681.518.002.56

З.Х. Павлова, А.Н. Краснов, Р.Р. Балтин, Р.А. Майский (Уфимский
государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Z.Kh. Pavlova, A.N. Krasnov, R.R. Baltin, R.A. Maiski
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

INCREASE OF DATA TRANSMISSION STABILITY IN WIRELESS INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

Введение

В последнее время реализация информационно-измерительных систем все чаще осуществляется в двух основных направлениях: в направлении увеличения пропускной способности каналов связи, прежде всего оптоволоконных, и в направлении перехода к беспроводным технологиям.

Существенным ограничением использования волоконно-оптических линий связи является значительная стоимость работ по их монтажу, тестированию и поддержке. В случае же беспроводной связи очень часто ограничивающим фактором является пропускная способность канала связи при накладываемых ограничениях по допустимому расстоянию между передатчиком и приемником, подбору оптимальной частоты передачи, ограничиваемой целым рядом факторов (местоположение и характеристики антенны, законодательные ограничения по максимальной выходной мощности и времени рабочего цикла, учет источников помех), выбору алгоритма приемопередачи и разделению частотного диапазона на отдельные каналы.

Background

Recently, the implementation of information-measuring systems is mainly carried out in two main directions: in the direction of communication channels capacity increasing, first of all fiber-optic, and in the direction of transition to wireless technologies.

A significant limitation of the of fiber-optic communication lines usage is the considerable cost of their installation, testing and support works. In the case of wireless communication, very often the limiting factor is the capacity of the communication channel, with restrictions imposed on the allowable distance between the transmitter and the receiver, the selection of the optimal transmission frequency, limited by a number of factors (location and characteristics of antenna, legislative limitations on maximum output power and cycle time, accounting for sources of interference), the choice of the transceiver algorithm and the frequency range separation into separate channels.

Разрешение вопроса разделения частотного диапазона предстает одним из наиболее значимых, поскольку неразрывно связано с необходимостью выбора величины девиации и максимально стабильного поддержания несущей частоты передатчика в ее пределах, а именно от этих аспектов в конечном итоге зависит качество приемопередачи, а также предельное количество одновременно работающих устройств в сети.

Обеспечение максимально возможного числа каналов приемопередачи неразрывно связано с ограничением отклонения несущей частоты передатчика относительно фиксируемого значения, вызываемого температурной нестабильностью частоты кварцевого резонатора, входящего в схему передатчика.

Цели и задачи

Анализ существующих подходов к термокомпенсации кварцевых резонаторов показал, что существует необходимость разработки более совершенного решения, отличающегося универсальностью и простотой в своей реализации.

Результаты

Предложен подход к компенсации температурной погрешности кварцевого резонатора за счет включения в микросхему передатчика GPS приемника.

Данный метод не требует сложных вычислительных операций и существенного усложнения аппаратной составляющей приемопередатчика. Также приведена формула расчета энергопотребления передатчика, учитывающая наличие дополнительного канала коррекции частоты.

Solution of the problem of frequency range separation occurs to be one of the most significant, as it is indissolubly related with the need to select the magnitude of the deviation and the maximum stable maintenance of the carrier frequency of the transmitter within it, namely, these aspects ultimately determine the transmit/receive quality, as well as the maximum number of simultaneously operating devices in network.

Providing the maximum possible number of transmit/receive channels is indissolubly related with the limiting of the carrier frequency deviation of the transmitter relative to a fixed value caused by the temperature instability of the frequency of the quartz resonator included in the transmitter circuit.

Aims and Objectives

An analysis of existing approaches to the temperature compensation of quartz resonators has shown that there is a need to develop a more perfect solution that is universal and simple in its implementation.

Results

An approach for temperature error compensation of a quartz resonator due to the inclusion of a GPS receiver in the microcircuit is proposed.

This method does not require complicated computational operations and a significant complication of the hardware component of the transmit/receive. Also a formula for calculating the power consumption of the transmitter taking into account the presence of an additional frequency correction channel is given.

Ключевые слова: беспроводная передача информации, кварцевый резонатор, термокомпенсация, информационно-измерительные системы, GPS приемник, девиация, частотный диапазон, расчет энергопотребления

Key words: wireless information transfer, quartz resonator, temperature compensation, information-measuring systems, GPS receiver, deviation, frequency range, calculation of power consumption

В последнее время реализация информационно-измерительных систем (ИИС) все чаще осуществляется в двух основных направлениях: в направлении увеличения пропускной способности каналов связи, прежде

всего оптоволоконных (ВОЛС), и в направлении перехода к беспроводным технологиям.

Существенным ограничением использования волоконно-оптических линий связи является значительная стоимость работ по их

монтажу, тестированию и поддержке. Средняя стоимость организации ВОЛС равняется 4000 у.е. за 1 км. В случае же беспроводной связи очень часто ограничивающим фактором является пропускная способность канала связи при накладываемых ограничениях по допустимому расстоянию между передатчиком и приемником, подбору оптимальной частоты передачи, ограничиваемой целым рядом факторов (местоположение и характеристики антенны, законодательные ограничения по максимальной выходной мощности и времени рабочего цикла, учет источников помех), выбору алгоритма приемапередачи и разделению частотного диапазона на отдельные каналы.

Разрешение вопроса деления частотного диапазона предстает одним из наиболее значимых, поскольку неразрывно связано с необходимостью выбора величины девиации и максимально стабильного поддержания несущей частоты передатчика в ее пределах, а именно от этих аспектов в конечном итоге зависит качество приемапередачи, а также предельное количество одновременно работающих устройств в сети. Необходимость размещения в сети большого количества приемапередатчиков неизбежно приводит к проблеме «тесноты в эфире», суть которой заключается в следующем: при фиксированной ширине частотного диапазона полоса частот, отводимая на один передатчик, должна быть как можно меньше. При таком условии возможен риск образования помех при приеме, поскольку вероятность выхода несущей частоты передатчика за пределы ширины канала под воздействием внешних факторов выше, а следовательно и выше вероятность ее наложения на частоту «соседнего» передающего устройства. В то же время расширение спектра колебаний на выходе передатчика делает необходимым расширение полосы пропускания приемника, что, в свою очередь, снижает качество принимаемого сигнала из-за возрастающего в этом случае соотношения сигнал/шум. Возврат прежнего соотношения сигнал/шум возможен за счет использования более мощного передатчика, однако в таком случае возрастет по-

требление энергии сетью, что негативно скажется на автономности ИИС в целом.

Наиболее часто с вопросами оптимальной конфигурации радиопередатчиков приходится сталкиваться при организации разветвленных ИИС, включающих средства измерения, передающие на субгигагерцовых частотах ISM диапазона. Дело в том, что в России для неспециализированных устройств, работающих в данном диапазоне, официально доступны две полосы частот: 864,0-865,0 МГц с периодом активной работы не более 0,1 % и запретом на работу вблизи аэропортов и 868,7-869,2 МГц без ограничений (последний диапазон условно именуется «868 МГц») [1].

Таким образом, для организации каналов связи разработчику ИИС доступна полоса частот шириной 500 кГц, что предъявляет жесткие требования к параметрам используемого радиоканала, поскольку для размещения в данном диапазоне большего числа каналов полоса частот, выделяемая на один радиоканал, должна быть минимально допустимой, что, в свою очередь, накладывает существенные ограничения на отклонения несущей частоты передатчика относительно фиксируемого значения, причиной которых является нестабильность частоты входящего в схему передатчика кварцевого резонатора. В работе [2] приведены данные, позволяющие численно оценить отклонение частоты: при стабильности частоты ± 25 ppm (миллионных долей от номинальной частоты резонатора), характерной в среднем для типового кварца, работающего на частоте 39 МГц, в случае передачи данных по радиоканалу на частоте 869 МГц реальное отклонение несущей частоты достигает $\pm 21,725$ кГц.

На практике отклонение частоты нередко оказывается даже больше приведенного выше расчетного значения, поскольку в расчетах не оценивается временная стабильность кварцевого резонатора. Так, в нашей практике при эксплуатации системы контроля технологических параметров, внедренной на Уренгойском нефтегазоконденсатном месторождении, начальный разброс частоты кварцевого генератора приемапередатчика составил от 20 до 30 кГц.

Одной из основных причин ухода частоты кварцевых генераторов является термическое воздействие окружающей среды. Нами был проведен эксперимент, наглядно отображающий явление ухода частоты кварцевого генератора в зависимости от температур. На рисунке 1 показан спектр сигнала, производимый передатчиком при величине девиации в 12 кГц при температуре окружающей среды, соответствующей нормальному режиму эксплуатации устройства. Несущая частота равна 869 МГц.

Как видно из рисунка 1, составляющие FSK сигнала разнесены на частоту девиации, спектр сигнала имеет 2 пика. Значениям «0» и «1» информационной последовательности соответствуют определённые частоты синусоидального сигнала справа и слева от значения несущей частоты при неизменной амплитуде.

На рисунке 2 показан спектр сигнала передатчика при температуре окружающей среды минус 27 °С. На рисунке 2 видно, что

пики спектра сигнала сместились влево, спектр сигнала с таким смещением уже не воспринимается корректно базовой станцией, что на практике означает потерю связи.

В настоящее время существует несколько подходов к повышению температурной стабильности рабочей частоты кварцевого резонатора, основывающихся как на улучшении качества самого резонатора, так и на применении различных методов введения температурной поправки. Как правило, термокомпенсированные кварцевые генераторы минимизируют нестабильность частоты за счет усложнения схемы, что зачастую приводит к увеличению размеров, потребляемой мощности и в конечном итоге увеличивает стоимость устройства и является абсолютно неприемлемым подходом для устройств с автономным питанием. Решения, положенные в основу этого метода коррекции, главным образом направлены на изменение формы пульсаций выходной температурной частотной характеристики.

Рисунок 1. Спектр сигнала передатчика в нормальном режиме эксплуатации

Рисунок 2. Спектр сигнала передатчика при температуре минус 27 °С

В работе [3] приведен пример стабилизации рабочей частоты генератора за счет введения температурной поправки. Описанный метод заключается в следующем: измеряется текущее значение отсчета температуры, после чего вычисляются текущий отчет скорости изменения температуры и характеристическая скорость изменения температуры. На основании полученных расчетов вычисляется оптимальное время счета, в соответствии с которым производят переизмерение температуры и перевычисление скорости измерения температуры. Компенсирующее воздействие вычисляется как функция двух переменных: текущего значения отсчета температуры и текущего отсчета скорости изменения температуры. Такое решение с аппаратной точки зрения является достаточно громоздким и приводит к повышению энергопотребления приемопередатчика, что неже-

лательно, особенно если ИИС должна быть автономной.

Наиболее рациональной альтернативой существующим подходам видится компенсация температурной погрешности за счет включения в микросхему передатчика GPS приемника, принимаемый которым сигнал от спутника представляет собой метку времени с точностью до пикосекунд. Опираясь на полученные от GPS приемника сигналы времени и сравнивая длину информационной посылки (количество импульсов), которую необходимо передать за определенный период, с длиной, полученной де факто, по временным отметкам GPS приемника, возможно вычислить отклонение несущей частоты кварцевого генератора и скомпенсировать ее посредством введения соответствующей поправки в алгоритм. Данный метод не требует сложных вычислительных операций и существенного

усложнения аппаратной составляющей приемопередатчика. В качестве источника GPS сигнала возможно использовать модуль TelitSL869-T, достоинствами которого являются высокая чувствительность, низкое энергопотребление, малое время холодного стар-

та, а также возможность выдачи эталонной частоты, синхронизированной со Всемирным координированным временем (UTC), с отклонением не более $20 \cdot 10^{-9}$ с.

На рисунке 3 приведена предлагаемая схема термокомпенсированного устройства.

Рисунок 3. Функциональная схема устройства коррекции рабочей частоты кварцевого генератора на основе GPS-сигнала

Предполагаемый принцип работы устройства состоит в следующем. Условием для начала процедуры коррекции частоты является «обрыв» связи между передатчиком и базовой станцией либо отклонение температуры окружающей среды на 10° от значения, использованного при калибровке или предыдущем сеансе подстройки. GPS приемник включается по управляющему сигналу микроконтроллера и после связи со спутником начинает выдавать сигналы эталонной частоты. Следующий этап - исполнение алгоритма программного блока, направленного на вычисление поправки частоты. Регистрация сигналов кварцевого генератора и GPS приемника осуществляется выделенными для этого таймерами микроконтроллера на протяжении

500 мс, осуществляется запись результатов в блок формирования поправки.

По окончании процедуры микроконтроллер отправляет вычисленную поправку для синтезатора частоты в узел управления радиомодуля. Одновременно осуществляется запись значения поправки во flash память микроконтроллера. Такое дублирование значения поправки в 60 % случаев позволит обойтись без GPS приемника при следующем сеансе коррекции.

Регистры узла управления позволяют подстраивать частоту встроенного синтезатора с шагом 500 Гц. Встроенный синтезатор, в свою очередь, генерирует как гетеродинный сигнал для приемника, так и FSK-модулированный сигнал для передатчика.

В работе [4] приведена формула расчета энергопотребления передатчика. С учетом

ввода дополнительного канала коррекции частоты вид формулы будет следующим:

$$e_i = T_1 \cdot e_s + n \cdot t_m \cdot (e_m + e_w - e_s) + n \cdot t_c \cdot (e_w - e_s) + n \cdot t_w \cdot (e_w - e_s) + n \cdot t_p \cdot (e_w + e_r - e_s) + ((2n - 1) \cdot t_r) \cdot (e_r + e_w - e_s) + ((2n - 1) \cdot t_i) \cdot (s_i + n \cdot (e_w - e_s)) + ((2n - 1) \cdot t_t) \cdot (z_i + e_w - e_s) + k_{gps} \cdot t_{gps} \cdot (e_{gps} + e_w),$$

где t_m - время, затрачиваемое аналого-цифровым преобразователем для измерения всех необходимых параметров;

t_c - время, затрачиваемое микропроцессором на обработку значений, полученных от аналого-цифрового преобразователя;

t_w - время перехода микропроцессора из спящего режима в рабочий;

t_p - временной интервал, отсчитываемый от момента включения приемника данных до начала передачи информации передатчиком;

t_r - время, затрачиваемое радиомодулем на переход в режим приема;

t_t - время, затрачиваемое радиомодулем на переход в режим передачи;

t_{gps} - время, затрачиваемое на процедуру коррекции частоты радиомодуля;

e_s - ток, потребляемый в спящем режиме микропроцессором;

e_m - ток, потребляемый аналого-цифровым преобразователем в режиме измерения;

e_w - ток, потребляемый в рабочем режиме микропроцессором;

e_r - ток, потребляемый радиомодулем в режиме приема;

e_{gps} - ток, потребляемый GPS приемником в процессе работы;

T_1 - длительность цикла сбора данных (реальная);

n - среднее ожидаемое количество попыток связи;

k_{gps} - коэффициент в диапазоне от 0 до 1, отражающий возможность проведения процедуры коррекции, по сохраненным в flash памяти значениям, без включения GPS приемника;

s_i - сумма значений энергопотребления радиопередатчика i -го узла при передаче от

кликеров во все узлы, передающие данные напрямую узлу i с учётом необходимых уровней мощности;

z_i - энергопотребление радиопередатчика i -го узла при передаче пакетов сообщений измерительной информации с учётом требуемого уровня мощности.

Моделирование работы системы подтвердило правильность примененных решений. При обеспечении стабильной работы системы радиопередачи во всем температурном диапазоне $(-40...+60)^\circ\text{C}$ время автономной работы сократилось всего на 14 %.

Таким образом, предлагаемый способ позволит не только минимизировать нестабильность несущей частоты приемопередатчика, но и разрешить проблему нехватки каналов для узкополосных частотных диапазонов за счет уменьшения девиации канала связи, что, в конечном итоге, позволит реализовывать большее количество устройств в сетях беспроводных информационно-измерительных систем.

Выводы

1. Проведен анализ факторов, влияющих на стабильность передачи данных в беспроводных информационно-измерительных системах.

2. Предложено решение повышения стабильности передачи данных в ИИС за счет включения в схему передатчика GPS приемника и введения алгоритма расчета поправки температурного ухода частоты кварцевого резонатора.

3. Приведена формула для расчета энергопотребления передатчика, учитывающая наличие дополнительного канала коррекции частоты.

Список литературы

1. Верхулевский К. Особенности и тенденции развития технологии LoRaWAN // Беспроводные технологии. 2017. № 2. С. 33-41.
2. Application Note. Electronic Counter Series. URL: <http://leapsecond.com/hpan/an200.pdf> (дата обращения: 20.11.2017).
3. Фитасов Е.С., Ивлев Д.Н., Морозов Н.С., Савельев Д.В. Система синхронизации времени и локального позиционирования на базе беспроводных сетей // Датчики и системы. 2017. № 8-9. С. 20-26.
4. Павлова З.Х., Балтин Р.Р., Краснов А.Н., Майский Р.А. Об основных аспектах проектирования беспроводных сетей параметрического мониторинга удаленных объектов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12 (54). С. 161-164.

Авторы

• Павлова Зухра Хасановна, д-р техн. наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Декан факультета «Автоматизация производственных процессов»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 242-08-51
e-mail: fapp@rusoil.net

• Краснов Андрей Николаевич канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: ufa-znanie@mail.ru

• Балтин Руслан Рафаэлевич
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Магистрант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: baltin.ruslan@yandex.ru

• Майский Равиль Анварович, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Математика»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: ravanmay@yandex.ru

References

1. Verkhulevskii K. Osobennosti i tendentsii razvitiya tekhnologii LoRaWAN [Features and Development Trends of LoRaWAN Technology]. *Besprovodnye tekhnologii - Wireless Technologies*, 2017, No. 2, pp. 33-41. (in Russ).
2. Application Note. *Electronic Counter Series*. URL: <http://leapsecond.com/hpan/an200.pdf> (accessed 20.11.2017).
3. Fitasov E.S., Ivlev D.N., Morozov N.S., Savel'ev D.V. Sistema sinkhronizatsii vremeni i lokal'nogo pozitsionirovaniya na baze besprovodnykh setei [Time Synchronization and Local Positioning System Based on Wireless Networks]. *Datchiki i sistemy - Sensors and Systems*, 2017, No. 8-9, pp. 20-26. (in Russ).
4. Pavlova Z.Kh., Baltin P.P., Krasnov A.N., Maiski R.A. Ob osnovnykh aspektakh proektirovaniya besprovodnykh setei parametricheskogo monitoringa udalennykh ob'ektov [About the Main Aspects of Design of Wireless Network Parametric Monitoring Remote Objects]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal - International Research Journal*, 2016, No. 12 (54), pp. 161-164. (in Russ).

The Authors

• Pavlova Zukhra Kh., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Dean of Automation of Production Processes Faculty
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062, Russian Federation
tel. (347) 242-08-51
e-mail: fapp@rusoil.net

• Krasnov Andrey N., Candidate of Technical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Automation of Technological Processes and Productions Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062, Russian Federation
e-mail: ufa-znanie@mail.ru

• Baltin Ruslan R.
Ufa State Petroleum Technological University
Undergraduate Student of Automation of Technological Processes and Productions Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062, Russian Federation
e-mail: baltin.ruslan@yandex.ru

• Maiski Ravil A., Candidate of Technical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Mathematics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062, Russian Federation
e-mail: ravanmay@yandex.ru