

# АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ФАЗЫ СИГНАЛА ДЛЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

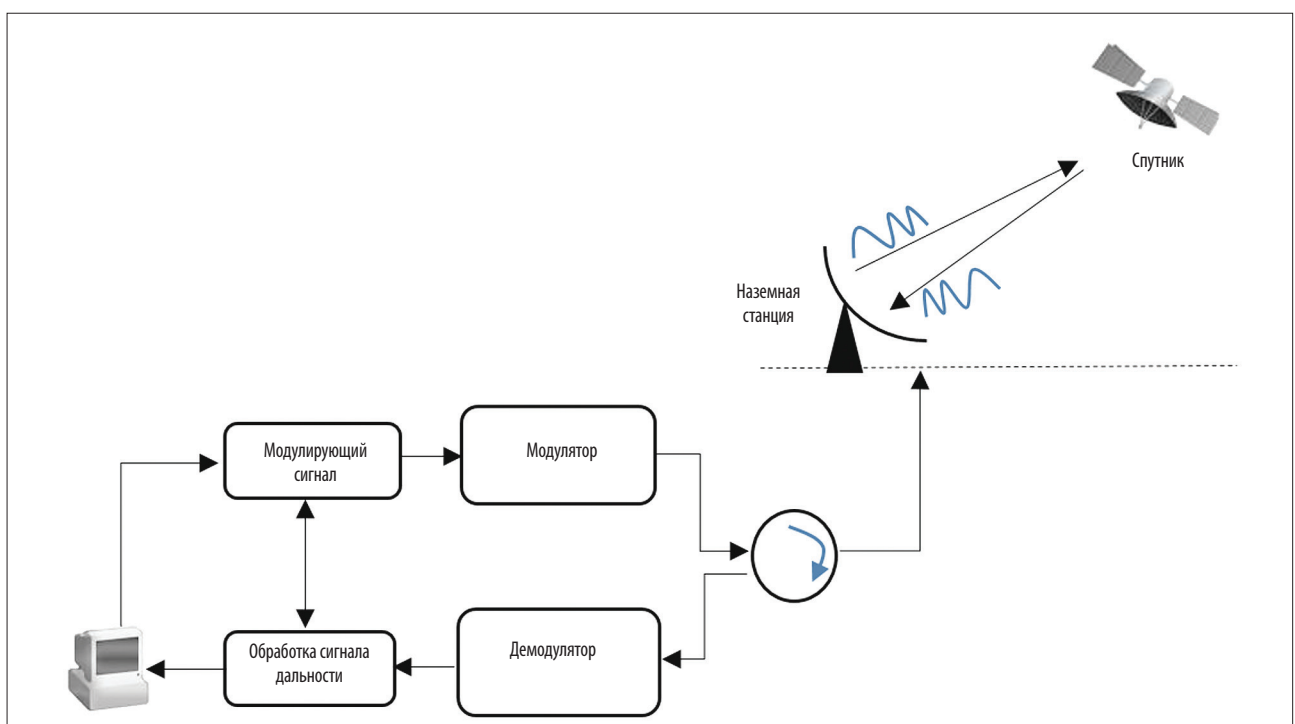
В статье обсуждаются базовые концепции работы системы фазового определения дальности, и предлагается надежный способ измерения стабильности фазы с помощью нового анализатора спектра N9040B серии UXA и программного обеспечения VSA 89600B.

**П**ервый в мире искусственный спутник земли, известный всем как Спутник-1, был запущен Советским Союзом более 50 лет назад. Вслед за ним в январе 1958 г. был запущен американский Explorer-1. Эти два события открыли новую эру практического использования космического пространства.

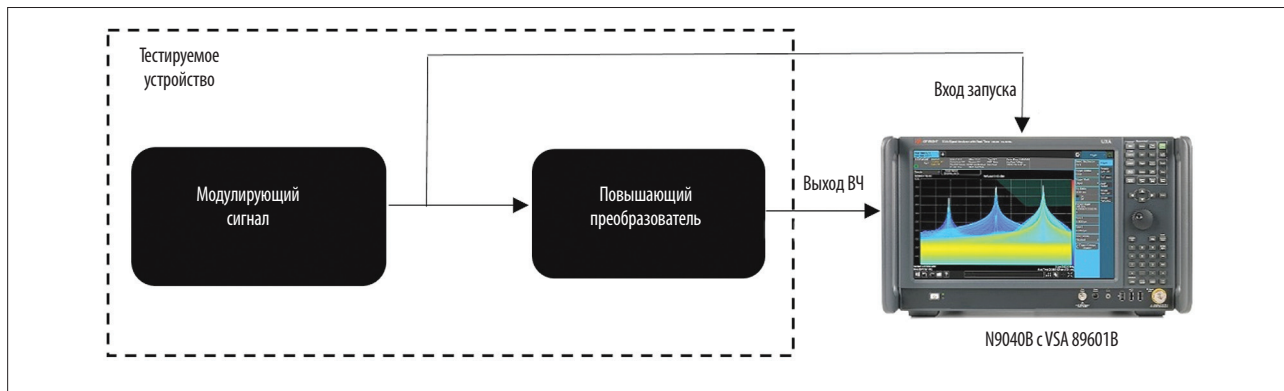
Контроль орбиты космического корабля или спутника играет очень важную роль, и все используемые для этого технологии должны обеспечивать высокий уровень надежности. Любой отказ в линии связи или в цепи обработки сигнала может привести к необратимым повреждениям и большим финансовым потерям. Классический способ позиционирования спутника на орбите основан на измерении расстояния между спутником и наземной станцией. Это расстояние определяется путем измерения времени прохождения радиосигнала от антенны наземной станции до космического корабля и обратно.

Для определения расстояния можно использовать классическую радиолокационную систему, но такой способ требует генерации мощных импульсов и применения специального оборудования. Системы измерения фазовым методом определения дальности используют для определения расстояния уже имеющееся коммуникационное оборудование космического корабля и наземной станции, передавая сигнал с наземной станции на спутник и ретранслируя тот же сигнал обратно на наземную станцию. Расстояние вычисляется по сдвигу фазы отправленного и принятого сигналов.

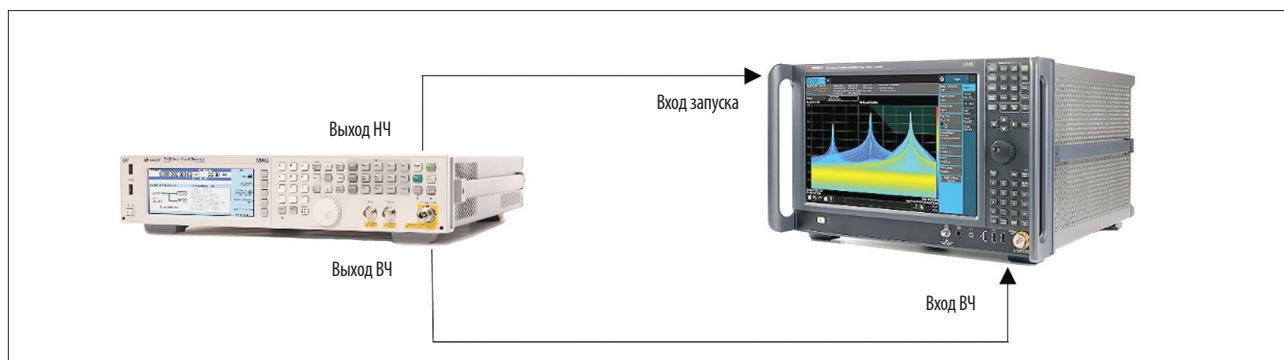
Таким образом, для измерения расстояния между спутником или космическим кораблем и наземной станцией применяется система измерения с фазовым методом определения дальности. Упрощенная структурная схема системы измерения дальности показана на рис. 1. Источник модулирующего сигнала генерирует синусоидальный сигнал, модулятор



▲ Рис. 1. Структурная схема измерения дальности



▲ Рис. 2. Схема измерения дальности



▲ Рис. 3. Калибровка системы для измерения частоты дальности

переносит этот сигнал на несущую нужной частоты, а затем сигнал передается на спутник через антенну. Транспондер спутника передает этот сигнал обратно на наземную станцию, где выполняется демодуляция и сравнение фазы полученного и переданного сигналов. Обычно все эти процессы управляются центральным компьютером. Сдвиг фазы между переданным и принятым сигналами прямо пропорционален времени прохождения сигнала от наземной станции до спутника и обратно. Следующие уравнения показывают зависимость сдвига фазы между двумя сигналами от расстояния между спутником и наземной станцией.

Если использовать упрощенную модель, то комплексный сигнал  $T_x$ , передаваемый наземной станцией, можно представить как:

$$T_x = Ae^{j\omega t} = Ae^{j\omega t}, (1)$$

где  $A$  — амплитуда сигнала,  $\omega$  — циклическая частота несущей.

Соответствующий принимаемый сигнал, ретранслированный транспондером спутника, можно представить как уменьшенную по амплитуде и сдвинутую по фазе копию тонального сигнала  $T_x$ :

$$R_x = ae^{j\omega(t-\tau)} = ae^{j\omega(t-\frac{2R}{c})}. (2)$$

В выражении фазы уравнения (2) задержка распространения равна  $2R/c$ , где  $R$  — расстояние между антенной и спутником,  $c$  — скорость света, равная  $3 \times 10^8$  м/с.

Расчет расстояния между наземной станцией и спутником выполняется путем анализа сдвига фазы между передаваемым и принимаемым сигналам:

$$\phi_{tx} - \phi_{rx} = \omega t - \omega(t - \frac{2R}{c}) = \frac{2R}{c}. (3)$$

В системе измерения дальности погрешность вычисления расстояния  $\pm 15$  м считается приемлемой, а это соответствует точности измерения задержки распространения  $\pm 100$  нс.

В реальных условиях два сигнала немного отличаются, например, в сигнал  $T_x$  нужно добавить как минимум один дополнительный компонент фазы:

$$T_x = e^{j(\omega t + \phi)}. (4)$$

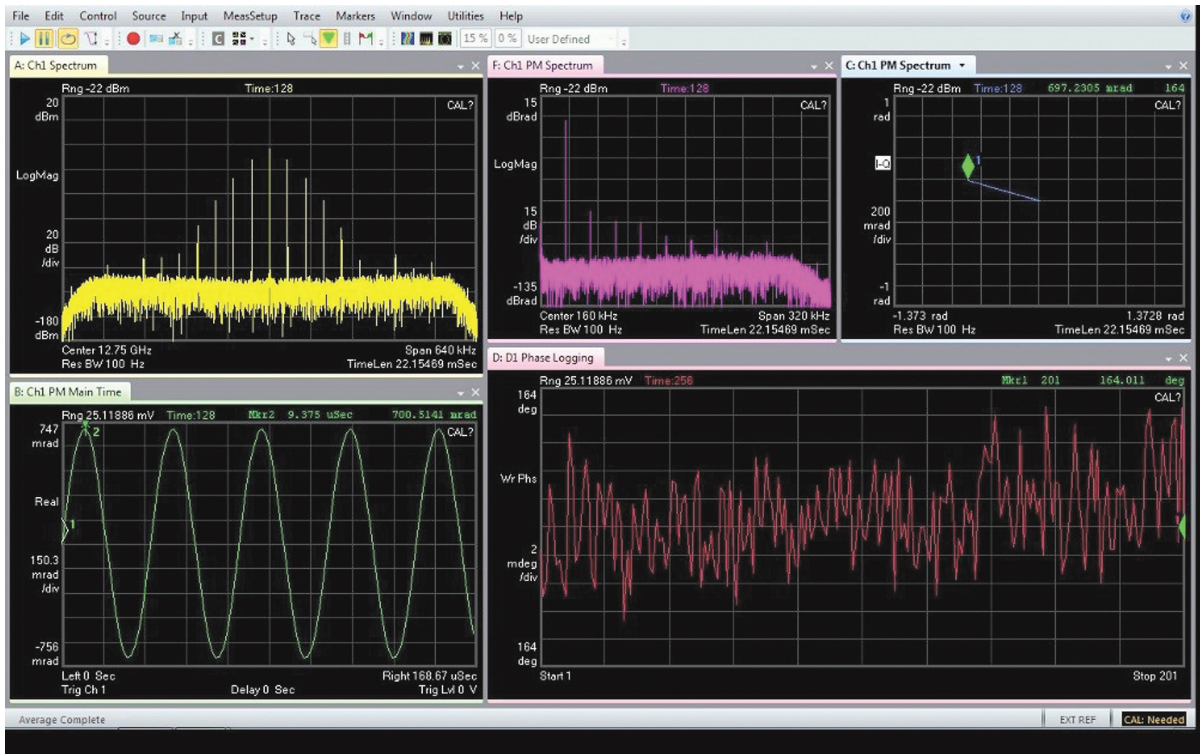
Компонент  $\phi$  представляет флуктуацию фазы на стороне передатчика. Этот компонент может порождаться разными факторами, такими как температура, нестабильность смесителя и погрешность гетеродина; и все эти факторы зависят от времени. Следовательно,  $\phi$  может ухудшить точность измерения расстояния до спутника.

Поскольку этот компонент будет присутствовать и в фазе сигнала  $R_x$ , то для точного определения положения спутника нужно максимально ограничить флуктуации фазы на выходе передатчика. Это значит, что фаза должна оставаться постоянной и пренебрежимо малой по сравнению с  $2R/c$ .

Далее мы поясним, как измерить стабильность фазы на стороне передатчика с помощью нового анализатора спектра N9040B серии UXA и программного обеспечения (ПО) векторного анализа сигналов VSA 89600B.

Схема измерения показана на рис. 2. В данном случае измерение выполняется на выходе повышающего преобразователя частоты. В качестве прибора, выполняющего это измерение, используется новый анализатор спектра N9040B, а для демодуляции, измерения и регистрации фазы используется ПО VSA 89600B.

В качестве модулирующего сигнала используется синусоидальный сигнал. Этот сигнал разделяется на два тракта. Первый поступает на повышающий преобразователь частоты, а второй используется для запуска анализатора N9040B,



▲ Рис. 4. Результаты испытаний в ПО VSA 89601B

в котором выполняется понижающее преобразование частоты и регистрация зависимости фазы от времени.

Стабильность фазы, измеренная векторным анализатором сигналов, определяется двумя компонентами. Она равна сумме стабильности фазы на выходе тестируемого устройства (Device Under Test, DUT) и погрешности фазы анализатора N9040B серии UXA:

$$\phi_M = \phi_{DUT} + \phi_{UXA}. \quad (5)$$

Погрешность фазы анализатора спектра N9040B не должна меняться со временем и должна быть как минимум на порядок меньше по сравнению с  $\phi_{DUT}$  (в этом случае ей можно пренебречь).

Это можно установить, выполняя предварительную калибровку системы, как показано на рис. 3. Во время калибровки для генерации сигнала с фазовой модуляцией используется источник сигнала MXG N5183B, а для запуска анализатора спектра используется внутренний НЧ-генератор MXG.

ПО VSA настроено таким образом, чтобы извлекать и регистрировать фазу сигнала. Снимок экрана ПО VSA приведен на рис. 4.

В окне Phase Logging («Регистрация фазы») видно, что график стабильности фазы откалиброванной системы построен в масштабе 2 мград/дел. по шкале Y, при этом флуктуации фазы лежат в диапазоне  $\pm 20$  мград.

Рабочая частота системы измерения дальности равна обычно 27 кГц, она модулирует по фазе частоту несущей. Предпочтение отдается фазовой модуляции, поскольку она не чувствительна к изменениям амплитуды и устраняет проблемы, возникающие в результате преобразования частоты. Чтобы гарантировать точное определение расстояния до спутника, стабильность фазы на выходе антенного разъема должна быть  $\pm 1^\circ$ , что соответствует погрешности расстояния  $\pm 15$  м. Если снова вернуться к уравнению (5), то, как уже говорилось, компонент  $\phi_{UXA}$  этого уравнения, вносимый анализатором спектра, можно считать пренебрежимо малым по сравнению со сдвигом фазы в тестируемом устройстве. Это значит, что новый анализатор N9040B серии UXA отлично подходит для такой задачи.

Свилируя частоту несущей, описанную здесь методику можно легко распространить на измерение стабильности фазы всего канала, включая тракты передачи и приема. Простая схема предложенного решения и уникальные возможности анализатора N9040B серии UXA позволяют расширить систему в область более высоких частот.