

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

13-85-599

Ю. И. Романов

МЕЖОБЪЕКТОВАЯ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ  
ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ АНАЛОГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

1985

Современные системы автоматизации научных исследований часто работают в условиях высокого уровня помех, создаваемых ускорителем заряженных частиц, больших перепадов напряжений, значительной удаленности экспериментальных установок от базовой ЭВМ. Поэтому эффективность систем передачи информации во многом определяется надежностью работы проводных и кабельных линий связи, протяженность которых измеряется километрами. Большие трудности возникают также при автоматизации высоковольтных платформ с установленными на них ионными источниками/1-3/.

Кардинальным решением многих проблем, возникающих в проводных и кабельных системах передачи информации, является переход к оптическим кабельным линиям связи. Замена проводных на волоконно-оптические линии связи /ВОЛС/ между крейтами КАМАК и аппаратурой приводит к уменьшению массы примерно в 10 раз, уменьшению потребляемой мощности более чем в 2 раза. Вместе с тем проявляется еще ряд преимуществ ВОЛС: широкополосность, высокое качество передачи, связанные с отсутствием взаимных помех между каналами, высокая помехозащищенность и помехоустойчивость, гальваническая развязка между блоками, сокращение состава и габаритов используемой аппаратуры.

Однако в практике изготовления ВОЛС на расстояние более 500-600 м возникают трудности стыковки отдельных участков волоконно-оптического кабеля /ВОК/. В связи с отсутствием стандартизации соединителей и средств сращивания ВОК, разработчики систем ВОЛС в разных странах решают эти вопросы в соответствии со своими возможностями/4/.

В работе описана прошедшая опытную проверку аппаратура передачи речевого сигнала 2-километровой аналоговой ВОЛС, строительная длина которой набиралась "дискретно", из отдельных волоконно-оптических кабелей различной длины. Сращивание последних производилось с помощью нестандартных стыковочных элементов.

## РАЗРАБОТКА ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ СВЕТОВОДНОЙ СИСТЕМЫ

Потери в оптоэлектронных системах со световодами состоят из потерь на входе и выходе, потерь в местах соединения и потерь передачи, пропорциональных длине ВОК. Возможные вариации этих потерь требуют, чтобы фотоприемник обладал динамическим диапазоном, приспособленным к этим изменениям, имел достаточную полосу пропускания и высокое отношение сигнал/шум при самом малом уровне светового потока. Для решения этой задачи

элементарная база ВОЛС должна отвечать определенным требованиям. Основные требования, предъявляемые к оптическому генератору, фотодетектору и монтажу при проектировании световой системы, подробно изложены в [2] и здесь не рассматриваются. В соответствии с целевым назначением ВОЛС следует особо сказать о выборе оптического кабеля для обеспечения качественных показателей линейного тракта.

Чтобы обеспечить передачу от светодиода в световод возможно большей мощности излучения, используется многомодовое волокно с различной числовой апертурой. Световую мощность, регистрируемую фотоприемником для световодных жил разных диаметров, можно записать следующими выражениями:  $P_{\phi 1} = P_1 - La_{01}$ ;  $P_{\phi 2} = P_2 - La_{02}$ ; где  $P_{\phi 1}$ ,  $P_{\phi 2}$  - световая мощность, регистрируемая фотоприемником соответственно на выходе волоконно-оптического кабеля /ВОК/ большого и малого сечения;  $P_1$ ,  $P_2$  - световая мощность, введенная в ВОК;  $L$  - строительная длина ВОК;  $a_{01}$ ,  $a_{02}$  - коэффициенты затухания каждого из этих кабелей. При условии  $P_{\phi 1} = P_{\phi 2}$  получаем выражение, позволяющее оценить эффективность кабелей разных сечений при разных длинах ВОК:  $L = (P_1 - P_2) / (a_{01} - a_{02})$ .

Опыт построения ВОЛС для двух используемых в настоящее время типов кабелей дал следующий результат:

- а/ КП /кварц-полимер/,  $\phi$  200 мкм,  $a_0 = 25$  дБ/км, вводимая световая мощность 20 мкВт = -17 дБм;
- б/ КК /кварц-кварц/,  $\phi$  150/60 мкм,  $a_0 = 10$  дБ/км, вводимая световая мощность 2 мкВт = -27 дБм.

Полученная зависимость мощности светового потока, регистрируемой фотоприемником, от длины ВОК позволяет сделать вывод о целесообразности использования оптических кабелей для изготовления ВОЛС со следующими строительными длинами:

- а/ типа КП - до 1000 м;
- б/ типа КК - от 1000 м и более.

Характеристика передачи оптической кабельной линии такова, что уровень оптического сигнала  $P_{пер}$  падает плавно на отрезках кабеля и скачками в точках соединений. Мощность сигнала на входе фотоприемника должна превышать заданную минимально допустимую мощность  $P_{ф.пр.доп}$ , при которой обеспечивается требуемое качество связи. Указанная мощность может быть рассчитана, она зависит от типа фотоприемника, заданного отношения сигнал/шум, вида линейного сигнала и т.д.

Обозначив уровень световой мощности, получаемый на выходе передатчика  $P_{пер}$ , получим [4]:

$$P_{пер} - a_c - p_{рар} - p_{н\alpha н} - a_0 L \geq P_{ф.пр.доп},$$

где  $a_0$  - коэффициент затухания в оптическом кабеле;  $a_c$  - потери при вводе и выводе излучения в волокно;  $a_p$ ,  $a_n$  - потери в разъёмных и неразъёмных соединениях отрезков кабеля ВОК;  $p_p$ ,  $p_n$  - число разъёмных и неразъёмных соединений на строительной длине;  $L$  - максимальная строительная длина ВОЛС.

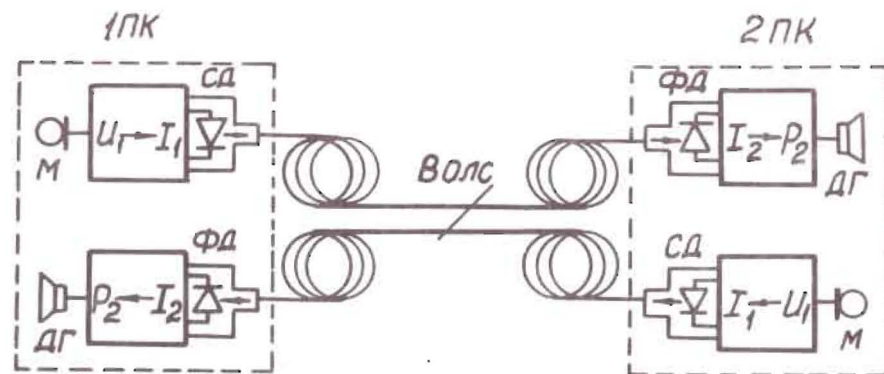


Рис.1. Структурная схема дуплексной аналоговой ВОЛС.

Соотношение, записанное выше, можно упростить, переписав его в виде:  $a_0 L + p_{рар} + p_{н\alpha н} \leq Q$ , где  $Q = P_{пер} - a_c - P_{ф.пр.доп}$ . Полученное выражение можно интерпретировать как энергетический потенциал используемой аппаратуры.

Структурная схема устройства передачи речевого сигнала приведена на рис.1. Она состоит из двух полукомплектов /1ПК, 2ПК/ и двухпроводной ВОЛС, что позволяет оператору работать дуплексом.

Поскольку 1ПК и 2ПК имеют одинаковый состав аппаратуры, рассмотрим работу только одного из них.

Речевой сигнал преобразуется в напряжение ( $U_1$ ) посредством микрофона (М), усиливается и преобразуется в ток ( $I_1$ ). В качестве преобразователя ток - оптический сигнал использован светодиод (СА). Модулированный луч света вводится в волоконно-оптический кабель для переноса информации на приемную часть схемы. Фотоприемник (ФД) преобразует модулированные сигналы в фототок ( $I_2$ ). На выходе трансимпедансного усилителя ток  $I_2$  преобразуется в напряжение, возбуждающее усилитель мощности ( $P_2$ ), к выходу которого подключена динамическая головка (ДГ).

Электрическая схема передающего устройства приведена на рис.2. В качестве микрофонного усилителя использован операционный усилитель (А1) типа К553УД2. Последний включен по схеме инвертирующего усилителя, коэффициент передачи которого определяется параметрами элементов цепи обратной связи. Модулятор тока светодиода собран на транзисторах V1, V2. Он выполнен как двухкаскадный усилитель, охваченный отрицательной обратной связью. Последняя позволила улучшить линейность модуляционной характеристики устройства.

Для ввода излучателя в линейный режим использовано постоянное токовое смещение  $I_{сдв} \approx 50$  мА. При величине модуляции ~60% амплитуда тока через светодиод не превышает  $\leq 100$  мА. Нелинейные искажения на выходе модулятора не превышают  $\leq 5\%$ . В устройстве

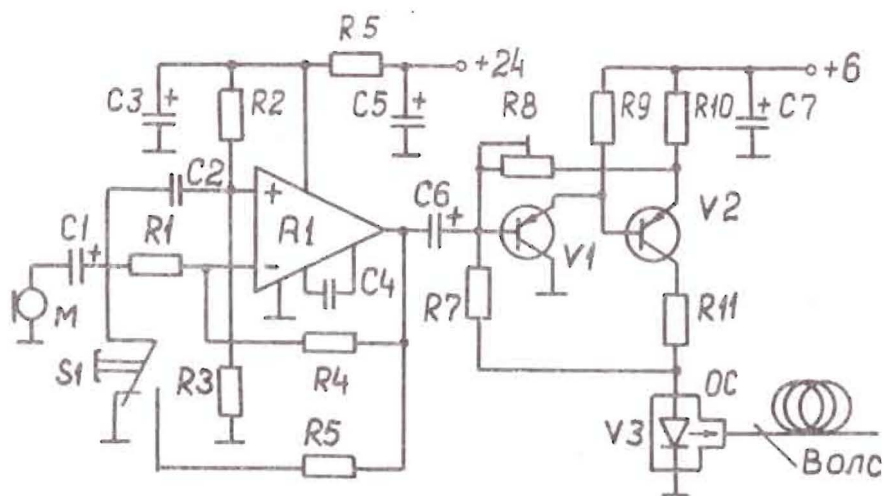


Рис. 2. Электрическая схема передатчика ВОЛС.

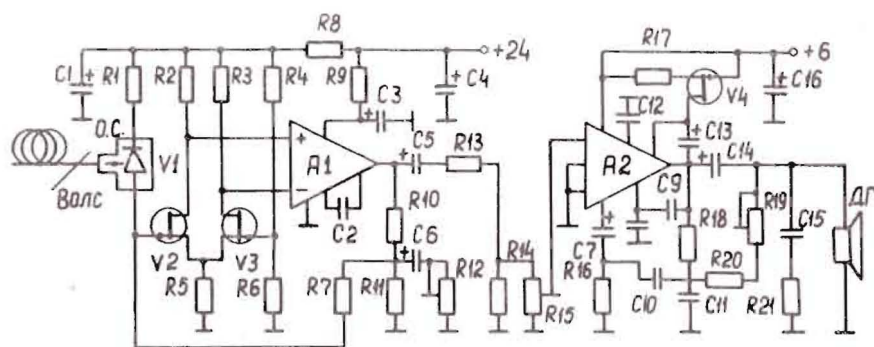


Рис. 3. Электрическая схема приемника ВОЛС.

предусмотрен акустический сигнал для вызова путем введения положительной обратной связи через кнопку S1. Электрическая схема приемного устройства приведена на рис. 3. Трансмпедансный усилитель /2/, положенный в основу устройства, представляет собой преобразователь "ток-напряжение", выполненный на дискретных компонентах. Он включает в себя р-п фотодиод (V1), дифференциальный предусилитель на полевых транзисторах (V2, V3) и основной усилитель (A1) на операционном усилителе К553УД2. Параллельная обратная связь, образованная резисторами R7 и делителем напряжения (R10, R11), устанавливает режим работы усилителя по постоянному току и определяет передаточное сопротивление  $Z = U_2/I_2$ . При изменении общего усиления на 15 дБ эквива-

лентное входное сопротивление усилителя изменяется в интервале 3-100 кОм, в частотном диапазоне 0,3-4 кГц. Усилитель мощности (A2) выполнен на микросхеме К174УН7 и нагружен на динамическую головку (ДГ).

Линия связи. Основная трудность при соединении компонентов оптических систем состоит в том, что поперечные размеры работающих в оптическом диапазоне излучателей, световодов и фотоприемников очень малы. Эти элементы должны при соединениях юстироваться относительно друг друга с высокой точностью и обеспечивать согласование характеристик, влияющих на потери энергии и искажение информации в местах соединений. Ниже сформулированы основные требования к оптическим соединителям, которые были положены в основу разработки межобъектовой ВОЛС:

- а/ простота соединения;
- б/ прочность и стабильность конструкции;
- в/ незначительное переходное затухание;
- г/ разъемность /за исключением жестких соединений/.

Разъемная конструкция использованного бинарного оптического соединителя для двухсветоводной кабельной сборки, подключаемой к аппаратуре, приведена на рис. 4. Точные соосные отверстия под компоненты и жесткая фиксация корпусных половинок со световодами в отверстиях прецизионных втулок составляют основу этой конструкции. Разделка моноволоконных кабелей в бинарный соединитель производилась по известной методике /4/. Потери мощности излучения не превышают ~1,5 дБ на соединение.

Неразъемные соединения использовались для наращивания общей строительной длины волоконно-оптической линии связи путем подключения отдельных кабелей ВОЛС, имеющих затухание 10 дБ/км. На рис. 5 приведена конструкция для сращивания волоконных кабелей встык, с направляющими для центрирования осей световодов с помощью прецизионной втулки /стеклянного капилляра/. В процессе испытаний были сделаны следующие выводы:

а/ 0 целесообразности введения иммерсионной жидкости для уменьшения потерь в точке соединения световодов. Капля жидкости вводилась через боковое отверстие, сделанное в стеклянном капилляре, что позволило согласовать показатели преломления световодов.

Среднее значение потерь на стык составило 0,5-0,8 дБ.

б/ Из-за несовершенства технологического процесса производства отдельные партии полученного оптического кабеля имели "расплюсченную" световодную жилу, что не позволило получить точного сопряжения двух световодов по площади торца в одном капилляре. Одним из приемлемых решений явилось использование юстируемого соединителя "световод-световод" /рис. 6/. Последний состоит из гильзы /5/ с большим центральным отверстием, в которую вставле-

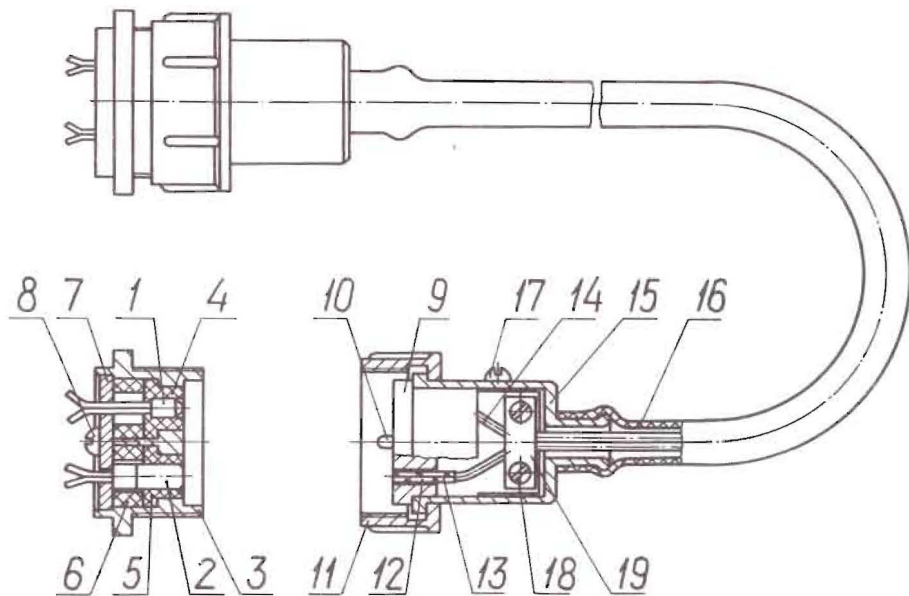


Рис.4. Бинарный оптический соединитель: 1 - светодиод; 2 - фотодиод; 3 - приборный корпус соединителя; 4,5 - изолирующая втулка; 6 - изолирующая шайба; 7 - фиксирующая шайба; 8,17,18 - винт; 9 - контактная втулка; 10 - штифт /фиксатор/; 11 - гайка накидная; 12 - капилляр; 13,14 - световод; 15 - защитный кожух; 16 - резиновый наконечник; 18 - прижимная пластина.

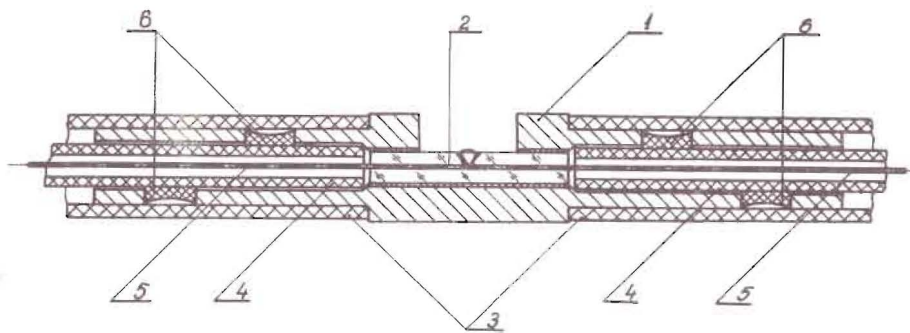


Рис.5. Неразъемный соединитель для сращивания кабелей ВОЛС с помощью прецизионной втулки: 1 - корпус; 2 - прецизионная втулка /капилляр/; 3 - резиновый наконечник; 4 - оболочка кабеля; 5 - световод; 6 - паз для клея.

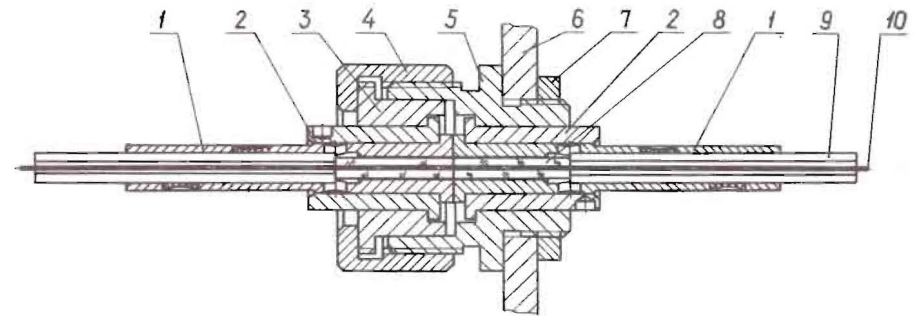


Рис.6. Юстируемый соединитель "световод-световод": 1 - втулка капилляра; 2 - втулка эксцентриковая; 3 - втулка фиксирующая; 4 - накидная гайка; 5 - корпус гильзы; 6 - панель прибора /при необходимости/; 7 - гайка; 8 - капилляр стеклянный; 9 - оболочка кабеля; 10 - световод.

ны два наконечника с оптическим кабелем. Посредством эксцентриков наконечники с заделанными световодными жилами взаимным поворотом выставляются так, чтобы оптические оси световодов /10/ были совмещены, после чего они жестко фиксируются гайкой /4/. Эксцентриситет эксцентриков составил  $\sim 0,1$  мм, что обеспечило точность их установки не хуже  $1 \text{ мкм/град}$ . Соединитель позволил получить потери не выше  $1,8 \text{ дБ}$  на стык.

При получении приемлемых коэффициентов затухания в соединителях выяснилось, что наибольшие потери в стыковочном узле были связаны с угловым смещением срачиваемых световодов.

Конструктивно электрические схемы полуккомплектов 1ПК и 2 ПК смонтированы в модулях 2М механического стандарта КАМАК. Они используют шины питания +6В и +24В магистрали крейта. На лицевой панели каждого из блоков /рис.7/ размещены: бинарный оптический разъем для подключения двухпроводной ВОЛС; электрический разъем для подключения микрофона; кнопка вызова абонента, регулятор громкости, а также гнезда типа LEMO, для подключения динамической головки и контроля параметров устройства.

Для организации односторонней линии связи общей строительной длиной  $\sim 1999$  м были использованы 5 бухт кабелей ВОЛС /длины  $\geq 350$  м/ с затуханием  $10 \text{ дБ/км}$ . Суммарное затухание в соединителях составило 9 дБ. Таким образом, общий энергетический потенциал используемой аппаратуры должен составлять  $Q \geq 29 \text{ дБ/см}$ . приложение/, что и было подтверждено экспериментом.

Качество работы устройства двухсторонней связи проверялось методом сравнения звучания двух каналов - основного и вспомогательного. Основной канал был образован одиночным кабелем ВОЛС

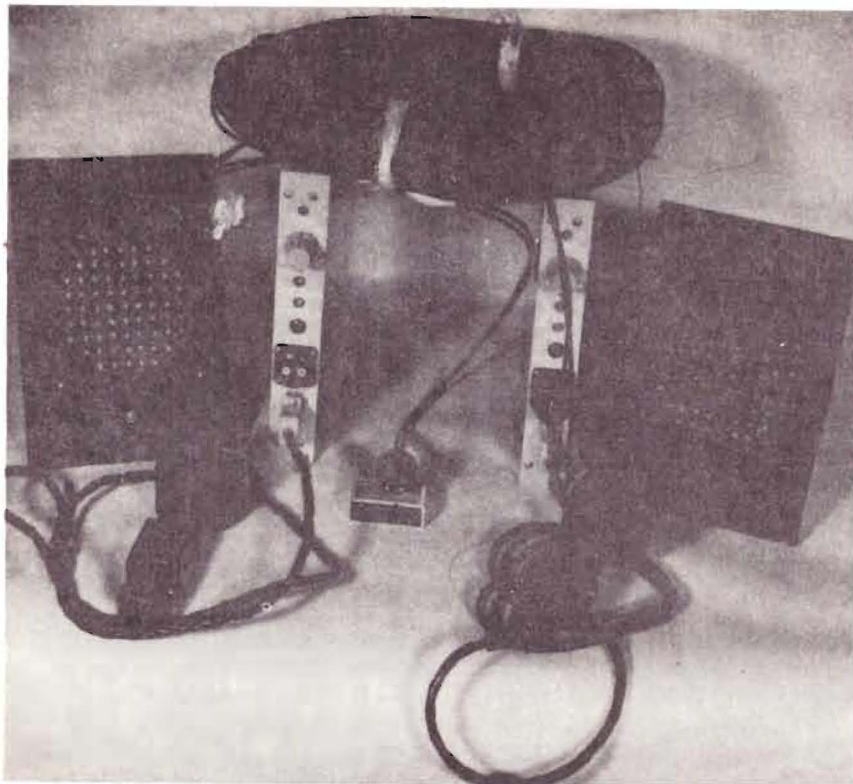


Рис.7. Общий вид системы ВОЛС,

в бухте, вспомогательный - 50-метровым коаксиальным электрическим кабелем, подключенным к УНЧ 2ПК. Речевой сигнал от микрофонного усилителя 1ПК, находившегося в соседнем здании, подключался поочередно к модулятору ВОЛС и к электрическому каналу. Результаты сравнения оказались хорошими, "на слух" различие в работе обоих каналов было небольшим.

В настоящее время система ВОЛС с укороченной линией связи /2x100 м/ эксплуатируется на установке СПИН/10/, обеспечивая надежную связь между высоковольтным терминалом и пультом управления.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность И.Н.Семенюшкину, Л.П.Зиновьеву, М.А.Воеводину - за стимулирование данной работы, Ю.В.Гусакову - за разработку оптических соединителей, П.Н.Буйлову - за изготовление блоков,

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Упрощенный расчет ВОЛС для передачи аналоговой информации

### I. Исходные данные

- Световод/5/:
  - а/ многомодовый, "кварц-кварц", 150/60 мкм;
  - б/ числовая апертура  $NA \approx 0,2$ ;
  - в/ затухание  $a_0 = 10$  дБ/км.
- Источник ИК-излучения:
  - а/ Светодиод типа АЛЮ7Б/6/, длина волны  $\approx 910$  нм;
  - б/ амплитуда максимального тока через световод  $I_1 = 0,1$  А;
  - в/ оптическая мощность, вводимая в световод:  
 $P_0 = 2$  мВт /-27 дБ/.
- Оптический передатчик /рис.2/:
  - а/ входное напряжение модулятора:  $U_M = 0,2$  В;
  - б/ эффективность светодиода при напряжении  $U_M$ :  $\eta = 20$  мВт/А;
  - в/ крутизна характеристики светодиода:  $S_{СИД} = 0,15$  А/В.
- Фотодетектор:
  - а/ кремниевый фотодиод ФД-27К/7/;
  - б/ постоянная времени  $\tau = 10^{-6}$  с;
  - в/ чувствительность на длине волны 910 нм:  $K \geq 0,35$  А/Вт.
- Трансимпедансный усилитель /рис.3/:
  - а/ передаточное сопротивление,  $Z = U_2/I_2 \approx 2 \cdot 10^9$  Ом;
  - б/ заданное отношение сигнал/шум на выходе оптоприемника,  $S/N = 15$  дБ.

### II. Энергетический бюджет системы/8,9.11/

- Среднеквадратичная величина переменной составляющей оптического передатчика, вводимой в световод:  $P_{пер} = \eta \cdot S_{СИД} \cdot U_M = -32$  дБм; /1 дБм = 1 мВт/.
- Собственные шумы приемного устройства:
  - а/ среднеквадратичная величина шумового напряжения на выходе усилителя:  $U_{ш} = 16$  мВ;
  - б/ мощность шума, приведенная к оптическому входу:  
 $P_{ш} = U_{ш}^2/KZ = -76$  дБм.
- Минимально допустимая мощность оптического излучения на входе фотоприемника  $P_{ф,пр.доп}$ , обеспечивающая отношение  $S/N = 15$  дБ:  
 $P_{ф,пр.доп} = S/N + P_{ш} = -61$  дБм.
- Энергетический потенциал используемой аппаратуры:  
 $Q = P_{пер} - P_{ф,пр.доп} = 29$  дБ.
- Суммарные потери за счет использования стыковочных элементов, включая оптические разъемы:  $\Sigma_{п} = \eta_{раp} + \eta_{нап} = 9$  дБ.
- Максимальная строительная длина волоконно-оптической линии связи:  $L \leq (Q - \Sigma_{п})/a_0 = 2$  км.

Следовательно, длина строительного участка ВОЛС ограничивается затуханием в линии передачи и не превышает 2 км.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Романов Ю.И. ОИЯИ, 10-81-295, Дубна, 1981.
2. Романов Ю.И. ОИЯИ, 13-82-279, Дубна, 1982.
3. Романов Ю.И. ОИЯИ, 13-83-478, Дубна, 1983.
4. ТИИЭР. /Пер. с англ./, 1983, т.71, № 2.
5. Коршунов В.Н. и др. Оптические кабели связи. "Связь", М., 1980.
6. Диоды и тиристоры. /Под ред. Н.А.Чернышева/. "Энергия", М., 1980, с.54.
7. Загороднюк В.Т. и др. Лазерная оперативная связь с промышленными объектами. "Связь", М., 1979, с.54.
8. Элиот Г., Элиот Х. Волоконная оптика в системах связи. "Мир", М., 1981.
9. Андрушко Л.М. и др. Волоконно-оптические линии связи. "Радио и связь", М., 1984.
10. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-83-582, Дубна, 1983.
11. Радио, телевизия, электроника, 1984, № 3 /НРБ/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 августа 1985 года.

Внимание организаций и лиц, заинтересованных в получении публикаций Объединенного института ядерных исследований

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

Physics of elementary particles and atomic nuclei.  
Theoretical physics.  
Experimental techniques and methods.  
Accelerators.  
Cryogenics.  
Computing mathematics and methods.  
Solid state physics. Liquids.  
Theory of condensed matter.  
Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

*JINR Rapid Communications* will be issued regularly.



Романов Ю.И.

13-85-599

Межобъектовая волоконно-оптическая линия связи для передачи аналоговой информации

Описана аппаратура передачи речевого сигнала по волоконно-оптическим линиям связи /ВОЛС/. Носителем информации является модулирование по интенсивности излучения светодиода. В приемной части в качестве оптоэлектронного преобразователя используется фотодиод. Присоединение двухпроводного оптического кабеля к аппаратуре осуществляется с помощью бинарных оптических разъемов. Для наращивания строительной длины ВОЛС использованы нестандартные стыковочные элементы. Устройство разработано для дуплексной связи на расстояние 2 км. Проведены необходимые расчеты системы.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Romanov Yu.I.

13-85-599

Interobject Fiber-Optic Lines  
for Transfer of Analog Information

An apparatus used for the transfer of a vocal signal via fiber-optic lines (FOL) is described. The radiation of a light diode modulated in intensity is an information carrier. A photodiode is used in the receiver as an optoelectronic transformer. A two-wire optic cable is connected to the apparatus by means of binary optical connectors. To increase the length of the POL, nonstandard joint elements are applied. The device has been developed for duplex connection at a distance of 2 km. Some calculations of the system are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985